



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**TUOMAS KIISKI**

**TAAJUUSMUUTTAJIEN LUOTETTAVUUS, HUOLLETTAVUUS  
JA KUNNOSSAPITO TEOLLISESSA YMPÄRISTÖSSÄ**

Diplomityö

Tarkastajat: professori Heikki Tuusa  
ja professori Seppo Virtanen  
Tarkastajat ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
15. elokuuta 2012

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**KIISKI, TUOMAS:** Taajuusmuuttajien luotettavuus, huollettavuus ja kunnossapito teollisessa ympäristössä

Diplomityö, 71 sivua, 2 liitesivua

Elokuu 2012

Pääaine: Sähkökäyttöjen tehoelektroniikka

Tarkastajat: professori Heikki Tuusa ja professori Seppo Virtanen

Avainsanat: Taajuusmuuttaja, IGBT, luotettavuus, huollettavuus, käyttövarmuus

Taajuusmuuttajien käyttövarmuus ja luotettavuus ovat oleellisessa osassa teollisten prosessien luotettavuutta ja käytettävyyttä. Tässä työssä tutkittiin kriittisiin ongelmiin johtaneita tekijöitä taajuusmuuttajien vikatilanteissa, ja miten taajuusmuuttajien yleistä luotettavuutta voisi parantaa. Työssä tutkittiin myös taajuusmuuttajien hankintahinnan suhdetta sen elinkaarikustannuksiin ja kuinka paljon taajuusmuuttajien merkkihuollot maksavat suhteessa hankintakustannuksiin. Teollisuuden yritykset ovat kiinnostuneita luotettavimmista taajuusmuuttajista, mutta kuinka paljon enemmän he olisivat valmiita maksamaan luotettavuuden noususta? Työn tavoitteena oli vertailla eri taajuusmuuttajavalmistajien suoriutumista näillä osa-alueilla.

Työ jakaantui kahteen osaan: teoriaosassa selvitetään taajuusmuuttajien ja IGBT-tehopuolijohteiden sähköistä ja mekaanista rakennetta sekä esitellään teoreettista pohjaa luotettavuudelle ja käyttövarmuudelle. Empiirinen osa suoritettiin UPM Kaipolan ja Jämsänkosken paperitehtailla. Tehtailta kerättiin taajuusmuuttajien vikahistoriatietoja lähivuosilta sekä yritettiin selvittää mitkä tekijät ovat johtaneet kriittisiin taajuusmuuttajavikoihin paperitehtailla. Empiirisessä osassa tutkittiin myös lämpötilan vaihteluiden vaikutuksia taajuusmuuttajan IGBT-moduuleihin.

Tutkimuksessa selvisi taajuusmuuttajien vikajakauma teholuokka- sekä valmistaja-kohtaisesti, vikojen esiintymistiheys kohdeyrityksen paperitehtailla sekä taajuusmuuttajien yleisimmät vikatyypit. Työssä löydettiin keinoja parantaa taajuusmuuttajien luotettavuutta.

# ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**KIISKI, TUOMAS:** Reliability and maintenance in Frequency Converters

Master of Science Thesis, 71 pages, 2 Appendix pages

August 2012

Major: Power Electronics of Electrical Drives

Examiners: Professor Heikki Tuusa and Professor Seppo Virtanen

Keywords: Frequency converter, reliability, maintenance, IGBT

The reliability of frequency converters is an important aspect of the general reliability and availability of the overall processes in industry. This thesis studies what issues led into critical problems with frequency converters and how the reliability of the frequency converters could be improved. The research also covers comparing the purchase price and the life cycle costs of the frequency converter and the maintenance costs related to them. The industrial companies are interested in more reliable frequency converters, but how much more they are willing to pay for the improvement of reliability? The goal of the thesis was also to compare manufacturers of frequency converters in these sectors.

The thesis is divided into two sections: The theory part contains the electrical and mechanical structure of frequency converters and IGBT-components (Insulated Gate Bipolar Transistor) and theoretical background of the reliability engineering and dependability. The empirical part of the research was done in the UPM paper mills in Kaipola and Jämsänkoski and the historical fault log data of the frequency converters was gathered from the mills. The main reasons for the critical issues and errors in frequency converters in industry was also explored. The empirical part also contains research about the effects of temperature fluctuation on the IGBT modules in frequency converters.

The research revealed the failure distribution of the frequency drives. The failures were classified by power of the frequency converters and by manufacturers. The overall failure rate and the most common types of faults of the frequency drives in paper mills were also discovered. The thesis also found the ways to improve the reliability of frequency converters.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyössä ABB Drivesin sekä UPM Kaipolan ja Jämsänkosken paperitehtaiden kanssa kevään ja kesän 2012 aikana. Työn ohjaajana toimi DI Ilmari Varjonen. Työn tarkastajina toimivat professori Heikki Tuusa ja professori Seppo Virtanen. Esitän heille kaikille suuret kiitokset saamistani hyödyllisistä neuvoista, ohjeista ja kommentteista työn aikana.

Lisäksi haluan osoittaa kiitokset myös Kjell Ingmanille (ABB Drives) neuvoista ja ohjauksesta, Matti Puonnakselle (UPM) käytännön järjestelyistä, Kimmo Tukiaiselle ja Arto Matilaiselle (UPM) arvokkaista tiedoista, Pate Valkeajärvelle (UPM) suuresta SAP-avusta, Kaipolan suunnitteluosastolle kaikesta aiheeseen liittyvästä tiedosta, Kaipolan ja Jämsänkosken automaatioasentajille ja –työnjohdolle lukuisista käytännön kokemuksista ja neuvoista.

Kiitokset myös perheelleni henkisestä ja taloudellisesta tuesta työn ja opintojeni aikana. Kiitos myös Nannalle työn oikoluvusta sekä kannustuksesta opintojeni aikana.

Lopuksi haluan kiittää Robert Allen Zimmermania, joka jaksoi kannustaa minua pitkillä automatkoilla sekä hyvinä kuin myös vaikeina aikoina läpi työn.

*”You better start swimming or you’ll sink like a stone”*

Tampereella 15.8.2012.

Tuomas Kiiski

# SISÄLLYS

<b>Tiivistelmä.....</b>	<b>II</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>Alkusanat .....</b>	<b>IV</b>
<b>Termit ja niiden määritelmät.....</b>	<b>VII</b>
<b>1. Johdanto.....</b>	<b>1</b>
1.1. Työn taustaa ja lähtökohdat .....	1
1.2. Aiheen rajausta ja työn tavoitteet.....	1
<b>2. Taajuusmuuttaja .....</b>	<b>3</b>
2.1. Sähköinen toiminta ja periaate .....	4
2.1.1. Tasasuuntauspiiri eli verkkosilta .....	6
2.1.2. Välipiiri .....	7
2.1.3. Vaihtosuuntauspiiri eli kuormasilta .....	8
2.1.4. Ohjauspiiri .....	10
2.1.5. Päävirtapiirin kytkinkomponentit .....	10
2.1.6. Elektrolyyttikondensaattorit.....	19
2.2. Mekaaninen rakenne .....	21
2.2.1. Kotelointi ja IP-luokat .....	21
2.2.2. Liitännät .....	24
2.2.3. Taajuusmuuttajan jäähdytys .....	25
<b>3. Taajuusmuuttajat teollisuudessa .....</b>	<b>26</b>
3.1. Sovelluskohteet .....	26
3.1.1. Sykliset taajuusmuuttajakäytöt .....	27
3.2. Mitoitussäännöt .....	27
3.3. Ympäristöolosuhteet .....	27
3.3.1. Lämpötila .....	28
3.3.2. Ilmankosteus .....	29
3.3.3. Epäpuhtaudet .....	30
3.3.4. Korroosio .....	30
3.4. Asennus ja käyttöönotto .....	31
3.4.1. Mekaaninen asennus .....	32
3.4.2. Sähköinen asennus .....	32
3.5. Huollot ja huoltovälit .....	33
3.6. Taajuusmuuttajan elinkaarikustannukset .....	34
<b>4. Käyttövarmuuden, luotettavuuden ja riskienhallinnan teoriaa .....</b>	<b>36</b>
4.1. Keskeiset käsitteet ja kaavat.....	36
4.1.1. Luotettavuus.....	37
4.1.2. MTTF.....	39
4.1.3. Käyttövarmuus ja käytettävyys.....	39
4.1.4. Huollettavuus ja huoltovarmuus .....	40
4.1.5. Epäkäytettävyys ja epäluotettavuus .....	40

4.1.6.	MTBF.....	41
4.1.7.	ROCOF eli hasardifunktio .....	41
4.2.	Luotettavuuskeskeinen kunnossapito.....	42
<b>5.</b>	<b>Tutkimusmenetelmät ja aineisto.....</b>	<b>46</b>
5.1.	Tehtaiden taajuusmuuttajakannan selvitys.....	46
5.1.1.	Tehtaiden taajuusmuuttajien sovelluskohteet ja käyttöpaikat .....	48
5.2.	Taajuusmuuttajien vika- ja historiatietojen kerääminen .....	48
5.2.1.	Tiedonkeräysmenetelmiä .....	49
<b>6.</b>	<b>IGBT-moduuleiden käytännön mittaukset ja elinikäennusteen tekeminen ....</b>	<b>51</b>
6.1.	Syklinen käyttösovellus .....	51
6.2.	Menetelmä ja mittausten suoritus .....	52
6.3.	Elinikäennusteen laskeminen .....	55
<b>7.</b>	<b>Tulokset ja niiden tarkastelu .....</b>	<b>58</b>
7.1.	Taajuusmuuttajien suoriutuminen teollisessa ympäristössä.....	58
7.1.1.	Taajuusmuuttajien yleisimmät vikatyypit.....	58
7.1.2.	Lämpötilan ja jäähdytyksen vaikutukset.....	59
7.1.3.	Ympäristön ilmanlaadun vaikutukset luotettavuuteen.....	60
7.2.	Eri taajuusmuuttajavalmistajien suoriutuminen tutkimuksessa .....	60
7.3.	Olosuhteet ja niiden vaikutukset tuloksiin .....	62
7.3.1.	Sähkötilan lämpötila- ja kosteusarvot.....	62
7.4.	Kunnossapito.....	65
7.4.1.	Huollettavuus .....	65
<b>8.</b>	<b>Johtopäätökset.....</b>	<b>67</b>
	<b>Lähteet.....</b>	<b>70</b>
	<b>LIITE 1: IGBT-moduulin puolijohteen syklikestoisuus.....</b>	<b>72</b>
	<b>LIITE 2: IGBT-moduulin pohjalevyn ja substraatin välinen syklikestoisuus .....</b>	<b>73</b>

# TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

## Lyhenteet ja käsitteet

A	Anodi
AC	Alternating Current; vaihtovirta
C	Kondensaattori
DC	Direct Current; tasavirta
Delaminaatio	Pinnoite irtoaa alustastaan tai erilliset pinnoitekerrokset irtoavat toisistaan
D	Diodi
DTC	Direct Torque Control; ABB:n käyttämä säätö- ja ohjausmenetelmä
EMC	Electromagnetic compatibility; sähkömagneettinen yhteensopivuus
ESR	Sähköisen komponentin sisäinen sarjavastus
G	Hila
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor; tehopuolijohde
IP-luokka	Sähkölaitteiden tiiviyn määrittelyluokka (IEC 60529)
K	Katodi
Kenttäväylä	Teollisuudessa käytetty reaaliaikainen ohjaus- ja tiedonsiirtoverkko
PWM	Pulse Width Modulation; pulssinleveysmodulaatio. Eräs taajuusmuuttajien tehonsäätömenetelmä
R	Vastus
RCM	Reliability Centered Maintenance; Luotettavuuteen perustuva kunnossapito
RMS	Root Mean Square; tehollisarvo
SAP	Yritysten toiminnanohjausjärjestelmiä valmistava yritys
Vikataajuus	Vikojen lukumäärä tietyllä aikavälillä
Weibull-jakauma	Luotettavuustekniikassa käytetty todennäköisyysjakauma komponentin vikaantumiselle sen eliniän aikana

## Symbolit

$\Delta$	Ominaisuuden muutos
$\alpha$	Kappaleelle ominainen lämpölaajenemiskerroin
$\lambda$	Vikataipumus
$\sigma$	Puristusjännitys
$\underline{a}$	Yksikkövektori
$A$	Käytettävyys
$E$	Kappaleelle ominainen kimmokerroin

$F$	Epäluotettavuus
$f$	Taajuus
$f(t)$	Vikatiheysfunktio
$V$	Vikatiilojen kesto aikavälillä $t_1..t_2$
$h$	Hasardifunktio
$I$	Virta
$l$	Kappaleen pituus
$L$	Selvinneiden yksilöiden lukumäärä
$MLDT$	Korjauksen aloittamiseen liittyvä keskimääräinen viive
$MTTF$	Keskimääräinen aika vikaantumisten välillä
$MTTR$	Keskimääräinen korjausaika
$N$	Tarkasteluaikana toteutunut syklimäärä
$N$	Lukumäärä
$N_f$	Vaurioon johtava syklimäärä
$N_t$	Normaalitilojen kesto yhteensä aikavälillä $t_1..t_2$
$P$	Todennäköisyys
$Q$	Vauriofunktio
$Q$	Epäkäytettävyys
$r$	Vikataajuusfunktio
$R$	Laitteen luotettavuus
$RH$	Suhteellinen kosteusprosentti
$R_{th}$	Lämmönsiirtovastus
$t$	Aika
$T$	Lämpötila
$t_f$	Vikaantumisaika
$t_{on}$	IGBT-moduulin kuormitusjakson pituus
$t_R$	Ajanjakso, jolle luotettavuus halutaan määrittää
$U$	Jännitteen tehollisarvo
$u$	Staattorijännitevektori
$v$	Korjausintensiteetti
$w$	Vikaintensiteetti
$V_{ce\_sat}$	IGBT:n päästötilan jännite

### Käytetyt alaindeksit

0	Suureen alkuperäinen arvo
b	IGBT-moduulin sisäinen liitoslanka
c	Case; IGBT-moduulin kotelo/pohjalevy
DC	Tasavirta
$DC\_max$	Enimmäistasajännite
f	Failure; vika
high-overload	Raskas käyttö



j	Junction; IGBT:n puolijohdeliitos
LL	Pääjännitteen tehollisarvo
low-overload	Normaali käyttö
nim	Nimellinen
on	IGBT:n kuormitusjakso
out	Tuotettu ulostulo
th	Thermal; lämmönsiirto
tot	Total; suure kokonaisuudessaan

# 1. JOHDANTO

Taajuusmuuttajat ovat yleistyneet teollisuudessa nopeasti viime vuosikymmenten aikana. Taajuusmuuttajan avulla voidaan esimerkiksi vaihtovirralla toimivan oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta säätää portaattomasti. Teollisuudessa säännöllistä huoltoa vaativat tasavirtamoottorit ovatkin suurimmaksi osaksi korvattu taajuusmuuttajaohjatuilla oikosulkumoottoreilla. Teollisuuden kiinnostus ja vaatimukset sähköisten laitteiden käyttövarmuutta ja luotettavuutta kohtaan on kasvanut suuresti viime vuosina. Taajuusmuuttajien ongelmat heijastuvat teollisuudessa usein suoraan prosessiin, josta aiheutuu suuria tuotannollisia tappioita. Taajuusmuuttajien suuren määrän vuoksi on myös niihin liittyvien vikojen lukumäärä lisääntynyt, mikä on johtanut prosessiteollisuudessa prosessin käytettävyyden laskuun. Tämän vuoksi taajuusmuuttajien luotettavuus, huollettavuus ja kunnossapito ovat alkaneet kiinnostaa yhä enemmän asiakkaita.

## 1.1. Työn taustaa ja lähtökohdat

Kirjallisuudesta löytyy jonkin verran teoreettista tietoa taajuusmuuttajien vikataajuuslaskelmista, mutta käytännön tutkimusta aiheesta ei ole helposti saatavilla. Tässä työssä selvitetään kuinka paljon ja kuinka usein taajuusmuuttajien kriittisiä vikoja teollisuudessa oikeasti tapahtuu.

## 1.2. Aiheen rajaus ja työn tavoitteet

Työssä käsitellään ainoastaan erilliskäyttöisiä taajuusmuuttajia. Linjakäyttöisiä taajuusmuuttajia ei ole huomioitu tutkimuksessa mitenkään. Erilliskäyttöihin keskitytään sen takia, että niiden luotettavuus ja huoltojen suorittaminen ovat yleensä asiakkaan vastuulla, kun taas linjakäytöt myydään prosessiteollisuuteen usein jonkinlaisilla käytettävyystakuilla.

Työ jakaantuu kahteen osioon: ensimmäisessä osassa käsitellään taajuusmuuttajien sähköistä ja mekaanista rakennetta, sekä perehdytään käyttövarmuuden ja luotettavuuden keskeisiin aihealueisiin. Käsiteltävä teoria on pyritty valitsemaan niin, että se käsittelee niitä asioita, jotka tutkimuksen edetessä on huomattu vaikuttavan taajuusmuuttajien luotettavuuteen.

Työn toisessa osassa selvitetään kahden suuren paperitehtaan taajuusmuuttajakanta sekä kriittisten vikojen lukumäärä tietyllä aikavälillä. Taajuusmuuttajakanta sekä taajuusmuuttajien viat jaotellaan myös teholuokka- sekä laitevalmistajakohtaisesti, jotta niiden välillä voidaan suorittaa vertailua. Työssä tutkitaan myös kriittisiin vikoihin johtaneita syitä sekä ympäristöolosuhteiden ja huoltojen vaikutusta taajuusmuuttajien vi-

kaantumisiin ja käyttövarmuuteen. Lisäksi työssä suoritetaan mittauksia taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajassa olevien IGBT-komponenttien eliniän ennustamiseksi sekä pohditaan kuormituksen vaikutusta niiden vikaantumisiin.

## 2. TAAJUUSMUUTTAJA

Taajuusmuuttaja on tehoelektroniikan laite, joka kytketään kahden erillisen sähköverkon välille. Sen pääasiallinen käyttötarkoitus on kolmivaiheisen oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden säätö. Suoraan vakiotaajuiseen kolmivaiheiseen sähköverkkoon kytketty oikosulkumoottori pyörii vakionopeudella, jonka määrää sähköverkon taajuus ja moottorin napapariluku. Oikosulkumoottorin nopeutta voidaan taajuusmuuttajan avulla säätää portaattomasti moottorille syötettävän jännitteen taajuutta muuttamalla. Tämä mahdollistaa tasavirta- eli DC-moottoreiden säädettävyyden, mutta ilman tasavirtamoottoreille ominaista tiheää huoltoväliä. Taajuusmuuttajakäyttöisillä moottoreilla käytetään yleisimmin pumppuja, kuljettimia ja puhaltimia.

Taajuusmuuttajaa käyttämällä voidaan saavuttaa monia merkittäviä hyötyjä verrattuna suoraan sähköverkkoon kytkettyyn moottoriin. Kolmivaiheinen oikosulkumoottori ottaa käynnistyksessä moottorille ominaisen suuren käynnistysvirran, joka aiheuttaa jännitteen alenemaa sähköverkossa. Taajuusmuuttajalla voidaan virtoja ja taajuutta säätää niin, että moottori kiihtyy ramppimaisesti ja käynnistysvirta pysyy kohtuullisena eikä sähköverkon jännite alene. Tällainen hidas kiihdytys sekä myös taajuusmuuttajan mahdollistama pehmeä pysäytys säästävät moottoria, työlaitteita, vaihteistoja, hammaspyöriä ja muita voimansiirtoon liittyviä komponentteja. Lisäksi prosessista tulee yleisesti ottaen pehmeämpi ja sulavampi.

Oikosulkumoottorin pyörimisnopeutta voidaan siis säätää tarkasti ja portaattomasti taajuusmuuttajan avulla. Yleisin säätöalue on 0 – 50 Hz, mutta joskus jopa 0 – 500 Hz asti. Pyörimisnopeuden tarkka ja nopea säätö mahdollistavat paremman lopputuotteen laadun, ja jos prosessi sallii nopeuden kasvattamisen, voidaan tuotantoa myös lisätä.

Energiansäästö on myös yksi yleinen taajuusmuuttajan käyttöperuste. Laitteiden tehonsäätö kannattaa tehdä pyörimisnopeutta säätämällä: moottori pyörii kuormituksen vaatimalla nopeudella. Energiansäästö on suurinta laitteilla, kuten pumpuilla ja puhaltimilla, joiden kuormamomenttikäyrä on neliöllinen: kuormitus lisääntyy pyörimisnopeuden neliöön ja tehonkulutus pyörimisnopeuden kuutioon verrannollisesti.

Taajuusmuuttaja on myös hyvin ohjelmoitavissa ja se voidaan helposti liittää automaatio- tai ohjausjärjestelmään kenttäväylän tai analogia- ja binääri viestien avulla. Taajuusmuuttajassa voi myös itsessään olla eräänlainen automaatiojärjestelmä eli täysin ohjelmoitava PID-säädin, joka mittaa prosessista haluttuja arvoja ja säätää moottorin nopeutta sen mukaan sopivaksi.

Suuri syy tasavirtamoottoreista taajuusmuuttajaohjattuihin oikosulkumoottori-käyttöihin siirtymisessä on suhteellisen vähäinen huollontarve. Taajuusmuuttajan huolto

on oikeissa olosuhteissa erittäin vähäistä: jäähdytyspuhallin ja ilmansuodatin vaihdetaan tarvittaessa. Liian vähäisestä jäähdytyksestä kuitenkin aiheutuu suuri osa taajuusmuuttajia vaivaavista ongelmista kuten komponenttien ennenaikaisesta ikääntymisestä ja lopulta hajoamisesta. Taajuusmuuttajat asennetaan usein teollisuuslaitoksen sähkötilaan (kuva 2.1).



**Kuva 2.1.** Sähkötilan seinälle asennettuja taajuusmuuttajia.

Yleisesti teollisuudessa käytettyjä taajuusmuuttajavalmistajia ovat Siemens, ABB, Danfoss, Mitsubishi, Control Techniques, Vacon, EurothermDrives, Telemecanique, Lenze, Yaskawa / Omron, SEW eurodrive ja Hitachi. Paperi- ja massateollisuudessa yleisimpiä merkkejä ovat ABB, Vacon ja Siemens. [1]

## 2.1. Sähköinen toiminta ja periaate

Taajuusmuuttaja on elektroninen laite, joka on pakattu usein muoviseen koteloon. Taajuusmuuttajassa yhdistyy pienitehoinen ohjauselektroniikka sekä suuria tehoja ohjaava ja siirtävä tehoelektroniikka. Taajuusmuuttajaan kytketään syöttävän verkon kaapelit ja siitä lähtevät moottorille menevät kaapelit. Yleensä taajuusmuuttajaa käytetään kolmivaiheisen syöttöverkon avulla, ja sillä ohjataan kolmivaiheista oikosulkumoottoria.

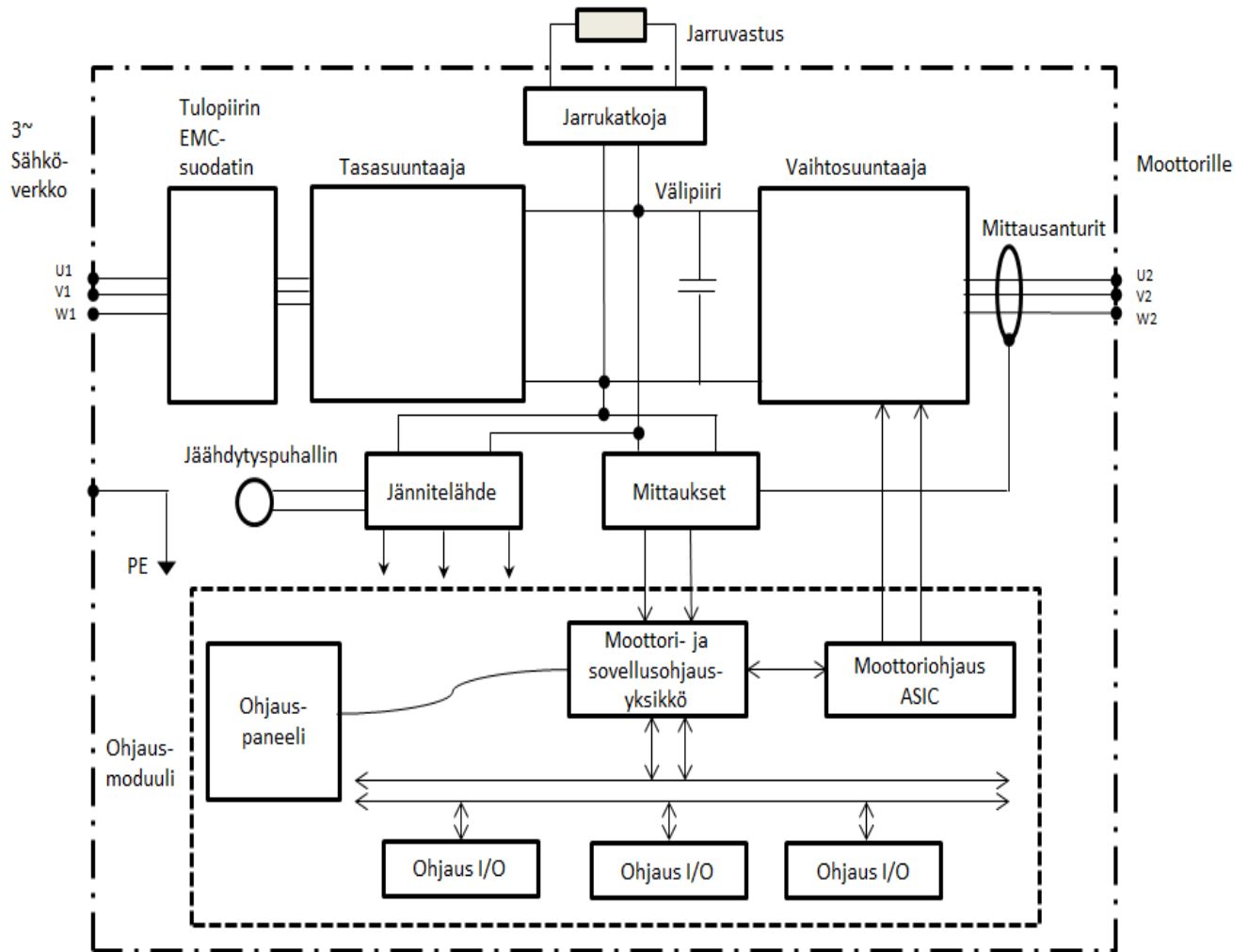
Syöttävän verkon kolme vaihetta U1, V1 ja W1 kiinnitetään taajuusmuuttajan syöttökaapeleiden kytkentärimaan ruuviliitoksilla (kuva 2.2). Tämän jälkeen kolmivaiheinen jännite tasasuunnataan tasajännitteeksi kolmivaiheisen tasasuuntaussillan avulla. Saadun tasajännitteen energia varastoidaan välipiiriin kondensaattoreihin (jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja) tai keloihin (virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja). Välipiirin tasajännitteestä voidaan vaihtosuuntaussillan avulla tehdä halutun taajuista vaihtovirtaa syötettä-

välillä moottorille. Moottorin kolmivaiheisen kaapelin vaiheet U2, V2 ja W2 kytketään taajuusmuuttajan lähdön kytkentärimaan ruuviliitoksilla (kuva 2.2). Syöttöverkko- ja moottorikaapeleiden suojamaat kytketään myös ruuviliitoksilla kytkentärimaan.



**Kuva 2.2.** Taajuusmuuttajan syöttö- ja lähtöverkon liitännät.

Kuvassa 2.3 (s. 6) on esitelty taajuusmuuttajan periaatteellinen lohkokaavio, josta käy ilmi miten eri lohkot ovat kytkeytyneinä toisiinsa. Syöttävän verkon vaiheet U1, V1 ja W1 menevät kytkentärimalta tulopiiriin EMC-suodattimelle, jossa tulosignaalista suodattetaan häiriösignaaleja pois. EMC-suodatin on kytkettynä tasasuuntaajaan, joka on kytkeytyneenä välipiiriin välityksellä vaihtosuuntaajaan. Välipiiriin on kytkeytyneenä myös jarrukatkoja ja jarruvastus, joiden avulla moottorin nopeasta jarrutuksesta aiheutuva, välipiiriin siirtyvä, teho muutetaan lämmöksi. Välipiiriin jännitettä mitataan erillisellä mittausyksiköllä, joka mittaa myös vaihtosuuntaajalta moottorille lähteviä jännitteitä ja virtoja. Mittausyksikkö antaa mittautietoja taajuusmuuttajan ohjausmoduulille. Ohjausmoduuli sisältää taajuusmuuttajan ohjauspaneelin, liitännät ulkoisille ohjauksille ja moottorinohjausyksiköt. Mittausyksiköltä saatujen tulosten perusteella moottorinohjausyksikkö ohjaa vaihtosuuntaajan kytkinkomponentteja niin, että vaihtosuuntaajalta moottorille lähtevässä kaapelissa kulkevat sellaiset jännitteet ja virrat, että moottori saadaan toimimaan halutulla tavalla. Välipiiristä ottaa käyttöjännitteensä myös taajuusmuuttajan jännitelähde, joka jakaa oikeanlaisia käyttöjännitteitä ohjausmoduulille, mittausyksikölle sekä taajuusmuuttajan jäähdytyspuhaltimelle.



**Kuva 2.3.** Taajuusmuuttajan periaatteellinen lohkokaavio.[2; 3]

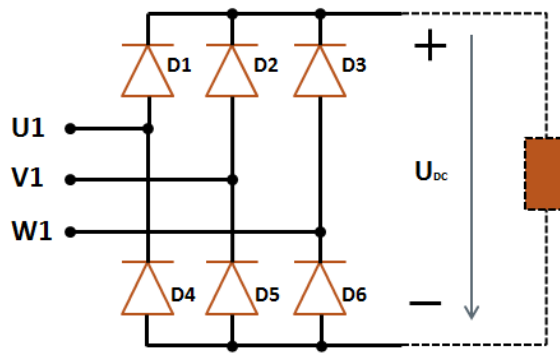
Eri valmistajien ja eri sukupolvien taajuusmuuttajien lohkokaavioissa on keskenään joitakin eroja. [2; 3]

### 2.1.1. Tasasuuntauspiiri eli verkkosilta

Tasasuuntaajan tehtävänä on muuttaa verkosta otettu vaihtosähkö tasasähköksi. Tasasuuntaus on nykyään yleensä hoidettu 6-pulssisella diodisillalla, jollainen on esitetty kuvassa 2.4 (s. 7). Ylädiodeissa suurimman anodipotentiaalin omaava diodi johtaa ja kaksi muuta ylädiodia ovat estobiasoituja. Alapuolen diodeista taas pienimmän katodipotentiaalin omaava diodi johtaa ja kaksi muuta aladiodia ovat estobiasoituja. Kuusi-pulssitasasuuntaajan tuottamalle tasajännitteelle voidaan johtaa teoreettinen kaava (1) virran ollessa jatkuva. [5]

$$U_{DC} = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{LL} \approx 1,35 \cdot U_{LL} \quad (1)$$

jossa  $U_{LL}$  on pääjännitteen tehollisarvo. Pääjännitteellä tarkoitetaan kahden vaiheen välistä jännitettä.



**Kuva 2.4.** Diodeilla toteutettu kuusipulssinen verkkosilta.

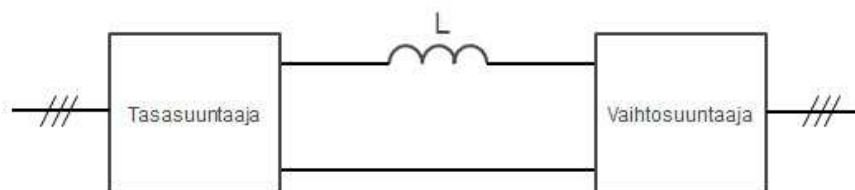
Käytännössä tasasuuntaajat toteutetaan useimmiten diodeita tai tyristoreja käyttäen. Diodi on puolijohdekomponentti, joka on toiminnaltaan täysin automaattinen. Se sallii virran kulun vain anodilta katodille, eikä se tarvitse minkäänlaista ohjausta. Käytännössä diodi vaatii kuitenkin pienen kynnysjännitteen alkaakseen johtaa. Kytkimen kääntö eli kommutointi tapahtuu kolmivaiheisen syöttöjännitteen pakottamana, joten kyseessä on *verkkokommutointi*.

Verkkosilta voi olla myös aktiivinen, jolloin välipiirin tasajännitettä voidaan vaihtosuunnata takaisin verkkoon päin moottorin toimiessa generaattorina. Aktiiviset verkkosillat toteutetaan yleensä IGBT-kytkinkomponenttien avulla, jolloin IGBT:n rinnalle tulee vastarinnankytketty nolladiodi estämään kytkintä avattaessa syntyvät ylijännitteet. [4]

### 2.1.2. Välipiiri

On olemassa kahdenlaisia taajuusmuuttajia: välipiirillisiä ja suoria. Valtaosa teollisuudessa nykyään käytetyistä taajuusmuuttajista on välipiirillisiä. Välipiirilliset taajuusmuuttajat voidaan jakaa virtavälipiirillisiin ja jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin.

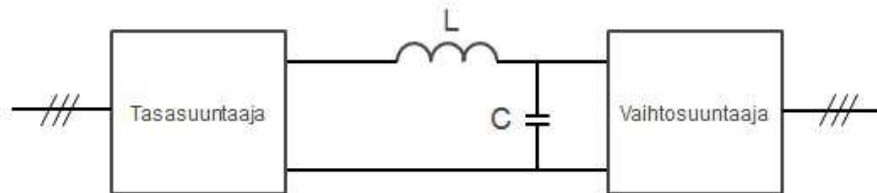
Virtavälipiirillisessä taajuusmuuttajassa (CSI, Current Source Inverter, kuva 2.5) välipiiri koostuu tasoituskuristimesta, joka pienentää tasavirran aaltoisuutta. Tällainen taajuusmuuttaja toimii virtalähteenä, joka syöttää moottorille sellaisen virran, että moottorin navoissa on haluttu jännite. Virran amplitudi määrätään tasasuuntaajalla. Tasavirtavälipiirillä varustetut taajuusmuuttajat ovat tarkoitettu yksittäismoottorikäyttöihin: vaihtosuuntaajan toimintaperiaatteesta johtuen tällaisen taajuusmuuttajan käyttö kentäheikennysalueella vaatii erikoistoimenpiteitä.



**Kuva 2.5.** Virtavälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatekuva.



Jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa (VSI, Voltage Source Inverter, kuva 2.6) taas on tasoituskuristimen lisäksi kondensaattori, joka pienentää tasajännitteen aaltoisuutta. Välipiirin kondensaattori ja kela toimivat myös energiavarastona. Tällaisissa taajuusmuuttajissa lähtöjännitteen amplitudia säädetään joko muuttamalla lähtöjännitteen pulssikuviota tai säätämällä välipiirin tasajännitettä. Pulssikuvion muuttamista kutsutaan pulssinleveysmoduloinniksi (PWM). Jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat soveltuvat sekä yksittäis- että monimoottorikäyttöihin.

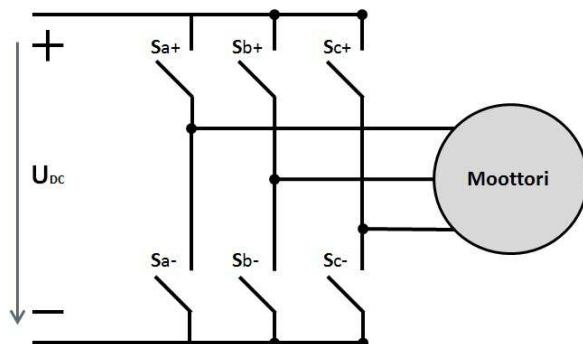


**Kuva 2.6.** Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaatekuva.

Jos taajuusmuuttajan lähtöjännitteen säätö tapahtuu välipiirin jännitettä säätämällä, on se varsin hidas: jännitteen muuttamiseksi joudutaan varaamaan ja purkamaan välipiirin suuria elektrolyyttikondensaattoreita. PWM-ohjatun taajuusmuuttajan jännitteen säätönopeus taas on suuri, koska jännitteen säätö tapahtuu vasta vaihtosuuntaajalla.

### 2.1.3. Vaihtosuuntauspiiri eli kuormasilta

Vaihtosuuntaajassa välipiirin tasajännite vaihtosuunnataan takaisin vaihtojännitteeksi moottorin haluamalle taajuudelle. Nykyään vaihtosuuntaajat toteutetaan lähes aina IGBT-komponenteilla, mutta kytkinkomponentteina voidaan käyttää myös muita tehopuolijohteita.



**Kuva 2.7.** Vaihtosuuntaajan periaatteellinen rakenne.

Vaihtosuuntaajassa olevat vaihekohtaiset ylemmät kytkinkomponentit  $S_{a+}$ ,  $S_{b+}$  ja  $S_{c+}$  voivat kytkeytyä välipiirin positiiviseen (+) kiskoon, ja vaihekohtaiset kytkinkomponentit  $S_{a-}$ ,  $S_{b-}$  ja  $S_{c-}$  voivat kytkeytyä välipiirin negatiiviseen (-) kiskoon. Välipiirin tasajännite on usein jaettu kahteen osaan, ja kiskojen välissä on erillinen nollapiste. Tällöin ylempi kisko on arvoltaan  $+\frac{1}{2} U_{DC}$  ja alempi kisko  $-\frac{1}{2} U_{DC}$ . Kolmivaihesuuntaajan eri kytkinkombinaatioiden määrä on kahdeksan kappaletta. Näistä kahdessa tapauksessa,

+++ tai ---, kaikki vaiheet ovat kytkeytyneitä joko positiiviseen tai negatiiviseen kiskoon. Tällöin suuntaajan tuottama jännitevektori on 0 eli niin sanottu nollavektori. Muissa kuudessa tapauksessa suuntaajan tuottama moottorin staattorijännite  $\underline{u}_s$  voidaan laskea kaavalla (2). [5]

$$\underline{u}_s = \frac{2}{3} U_{dc} (\underline{a}^0 S_a + \underline{a}^1 S_b + \underline{a}^2 S_c) = \frac{2}{3} U_{dc} \cdot e^{j(n-1)\pi/3} \quad (2)$$

jossa  $U_{dc}$  = välipiirin tasajännite

$S_a, S_b, S_c$  = vaihekohtaisten kytkimien tila (+1/2 tai -1/2)

$n = 1 \dots 6$

Yksikkövektorit  $\underline{a}^0, \underline{a}^1$  ja  $\underline{a}^2$  voidaan määrittää seuraavasti:

$$\underline{a}^0 = e^{j0}$$

$$\underline{a}^1 = e^{j2\pi/3}$$

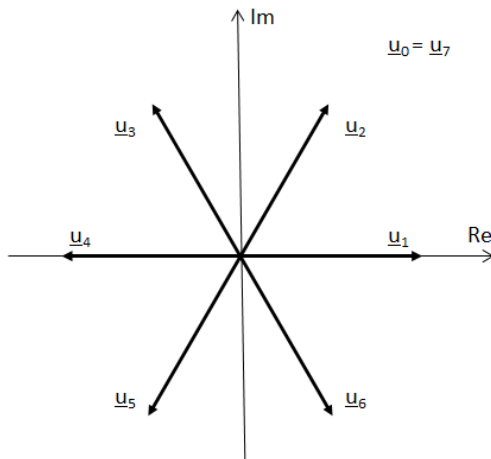
$$\underline{a}^2 = e^{j4\pi/3}$$

Staattorijännite, eli taajuusmuuttajan tuottama jännite oikosulkumoottorin staattorille, muodostuu yksikkövektoreiden avulla laskettavien suuntakertoimien ja välipiirin tasajännitteen tulosta (taulukko 2.1). [5; 9]

**Taulukko 2.1.** Jännitevektorien laskenta suuntakertoimien perusteella.

$S_a$	$S_b$	$S_c$	Suunta	Suuntakertoimet	Staattorijännite
-	-	-	0	$u_0 = 0$	$\underline{u}_0 = 0$
+	-	-	$+\underline{a}^0$	$u_1 = \frac{2}{3} \cdot \underline{a}^0$	$\underline{u}_1 = \frac{2}{3} \cdot U_{dc} \angle 0^\circ$
+	+	-	$-\underline{a}^2$	$u_2 = -\frac{2}{3} \cdot \underline{a}^2$	$\underline{u}_2 = \frac{2}{3} \cdot U_{dc} \angle 60^\circ$
-	+	-	$+\underline{a}^1$	$u_3 = \frac{2}{3} \cdot \underline{a}^1$	$\underline{u}_3 = \frac{2}{3} \cdot U_{dc} \angle 120^\circ$
-	+	+	$-\underline{a}^0$	$u_4 = -\frac{2}{3} \cdot \underline{a}^0$	$\underline{u}_4 = \frac{2}{3} \cdot U_{dc} \angle 180^\circ$
-	-	+	$+\underline{a}^2$	$u_5 = \frac{2}{3} \cdot \underline{a}^2$	$\underline{u}_5 = \frac{2}{3} \cdot U_{dc} \angle 240^\circ$
+	-	+	$-\underline{a}^1$	$u_6 = -\frac{2}{3} \cdot \underline{a}^1$	$\underline{u}_6 = \frac{2}{3} \cdot U_{dc} \angle 300^\circ$
+	+	+	0	$u_7 = 0$	$\underline{u}_7 = 0$

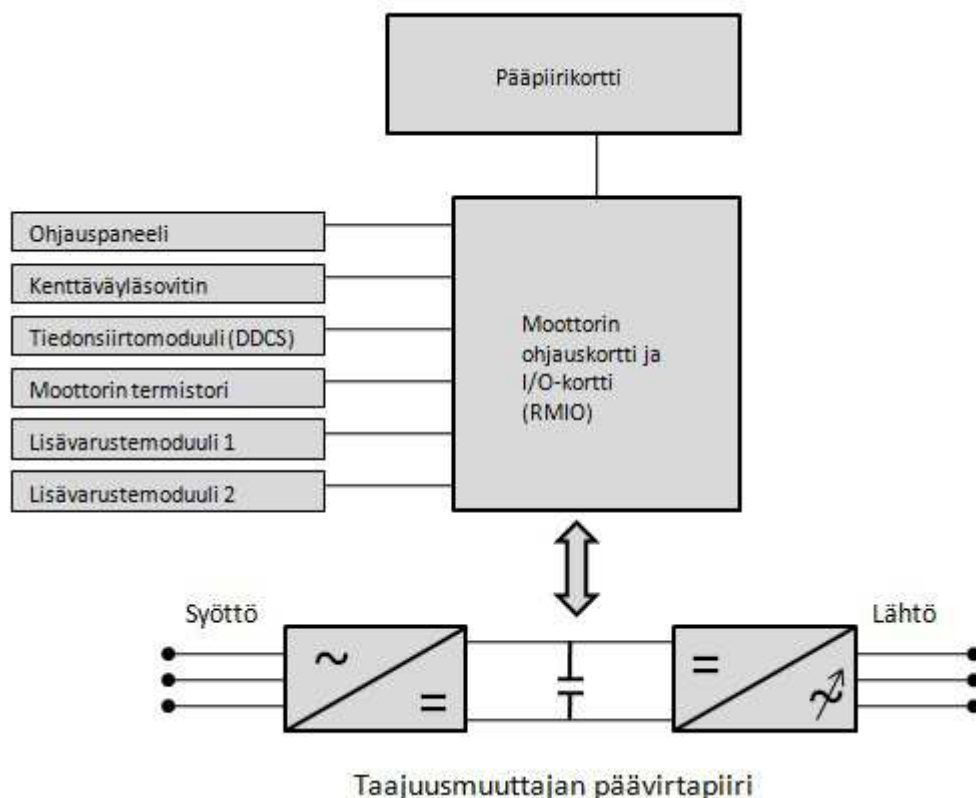
Kuvassa 2.8 on esitetty kytkentätiloja vastaavat jännitevektorit kompleksitasossa.



**Kuva 2.8.** Kytkentätiloja vastaavat staattorijännitevektorit kompleksitasossa.

#### 2.1.4. Ohjauspiiri

Taajuusmuuttajan älynä toimii moottorinohjaus- ja I/O-kortti (RMIO), joka muodostuu signaaliprosessorista ja sen ympärille rakennetusta logiikasta. Taajuusmuuttajaa voidaan ohjata eli antaa sille ohjearvoja sekä moottorin käyntisuunta-, pysäytys- ja käynnistyskomentoja joko ohjauspaneelista tai digitaali- ja analogitulojen kautta. Useisiin taajuusmuuttajiin saa lisäksi lisävarusteena kenttäväyläsovittimen, jonka avulla taajuusmuuttajaa voidaan ohjata avoimen kenttäväyläliitännän kautta. Kuvassa 2.9 on esitelty taajuusmuuttajan ohjauspiirin periaatteellinen lohkokaavio. [6]



**Kuva 2.9.** Taajuusmuuttajan ohjauspiirin periaatteellinen lohkokaavio.

Taajuusmuuttajan tilaa voi tarkkailla analogialähdöistä ja relelähdeistä. Digitaalitulot ohjaavat yleensä käynnistystä, pyörimissuuntaa ja vakionopeuksia. Laitteelle voidaan antaa taajuusohje yleensä analogiatuloilla, jotka ovat joko virta- tai jännitetuloja. Relelähdeillä voidaan yleensä antaa myös tieto laitteen vikatilasta. Moottorinohjauskortille tulee erilaisia mittaustietoja taajuusmuuttajan päävirtapiiriltä, ja näiden tietojen avulla kortti pystyy ohjaamaan vaihtosuuntaajan kytkinkomponentteja halutulla tavalla. [2]

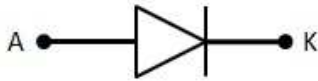
#### 2.1.5. Päävirtapiirin kytkinkomponentit

Taajuusmuuttajien päävirtapiirissä on käytetty eri aikakausina erilaisia tehopuolijohteita kytkinkomponentteina. Eri tehopuolijohteilla on erilaiset ominaisuudet kuten virran ja jännitteen kesto sekä maksimikytkeätaajuus eli kuinka nopeasti kytkimiä voidaan ava-

ta ja sulkea. Kytkinkomponentti toimii taajuusmuuttajan päävirtapiirissä virran katkojana. Se on joko virtaa johtavassa tilassa tai estävässä tilassa riippuen sen yli olevan jännitteen polariteetista tai kytkinkomponentin kannalle tulevan ohjaussignaalin tasosta ja polariteetista. Johtavassa tilassa olevien kytkinkomponenttien jännitehäviöissä on myös eroja. Nykyään olemassa olevat tehopuolijohteet voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan niiden ohjattavuuden perusteella: diodeihin, tyristoreihin sekä ohjattaviin kytkinkomponentteihin. [10]

### Diodit

Diodit ovat yksinkertaisimpia kytkinkomponentteja. Niitä ei voi ohjata johtamaan tai sammuttaa virran kulkua erillisellä ohjaussignaalin avulla. Kuvassa 2.10 on esitelty diodin yleisesti käytetty piirrosmerkki.

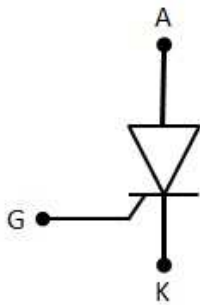


**Kuva 2.10.** Diodin piirrosmerkki.

Diodit alkavat johtaa virtaa kun ne ovat myötäsuuntaan biasoituneita, eli anodilla (A) on suurempi jännite kuin katodilla (K). Tällöin diodin yli on vain pieni myötäsuuntainen jännite puolijohteen yli. Kun diodi on vastasuuntaan biasoitunut eli katodilla on suurempi jännite kuin anodilla, vain erittäin pieni vuotovirta pääsee kulkemaan diodin läpi ennen kuin jännite nousee läpilyöntijännitteen tasolle. Läpilyöntijännitteen tasoa ei pitäisi saavuttaa normaalitoiminnassa koskaan. Diodin on- ja off-tiloja ohjataan siis teho- ja ohjapiirien avulla. Suurimmassa osassa tehoelektroniikan piirejä diodia voidaan pitää ideaalisena kytkimenä, sillä se alkaa johtaa virtaa ja katkaisee virran kulun nopeasti. [7; 10]

### Tyristorit

Tyristorit ovat osittain ohjattavia kytkinkomponentteja. Ne voidaan saattaa johtavaan tilaan, mutta niitä ei voi sammuttaa erillisen ohjaussignaalin avulla. Kuvassa 2.11 on esitelty tyristorin yleisesti käytetty piirrosmerkki.



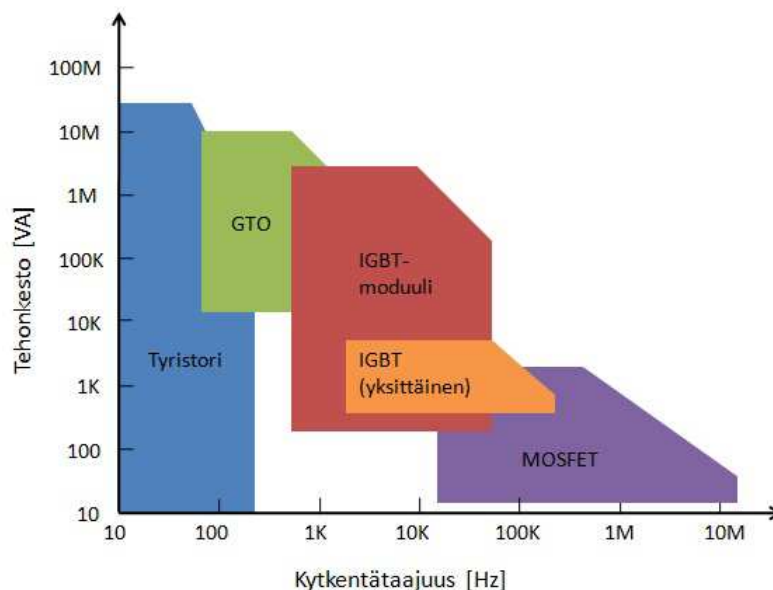
**Kuva 2.11.** Tyristorin piirrosmerkki

Tyristorien läpi kulkee virta anodilta (A) katodille (K). Kun tyristori on off-tilassa (ei johda virtaa) niin se voi olla myötäsuuntaan biasoituneena (anodilla on suurempi jännite kuin katodilla) ja estää silti virran kulun lävitseen. Vasta kun tyristorin hilalle (G, gate) tuodaan positiivinen virtapulssi ja samaan aikaan tyristori on myötäsuuntaan biasoitunut, alkaa sen läpi kulkea virta. Virta jatkaa kulkuaan tyristorin lävitse, vaikka hilalle ei enää tuodakaan virtaa ja se voidaan sammuttaa ainoastaan kun anodivirta muuttuu negatiiviseksi eli anodille tulee pienempi jännite kuin katodille. Tyristori on silloin vastasuuntaan biasoitunut. Tyristoria siis ei voida sammuttaa hilavirran avulla. Kun tyristori on myötäsuuntaan biasoitunut ja se on johtavassa tilassa, on tyristorin yli 1 - 3 V jännitehäviö. Yleensä tyristorit kestävät yhtä paljon jännitettä myötä- ja vastasuuntaan ja yleensä ilmoitetaan kuinka paljon se voi keskimäärin johtaa virtaa lävitseen (rms).

On olemassa paljon erilaisia tyristoreita erilaisiin käyttötarkoituksiin. Käyttösovelluksen mukaan voidaan valita tyristoreita, joilla on erilainen jännitteen- ja virrankesto, kytkentänopeus, myötäsuuntainen jännitehäviö johtavassa tilassa sekä virran nousunopeus sytytyksessä. [7; 10]

### Hilalta täysin ohjattavat komponentit

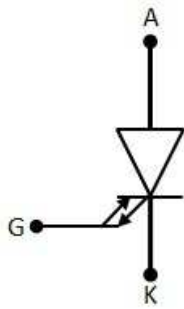
Tehoelektroniikan sovelluksissa käytetään myös paljon puolijohdekomponentteja kytkiminä, joita voidaan ohjata sekä *päälle* että *pois* hilavirran avulla. Tämän kaltaisia ovat muun muassa BJT (Bipolar Junction Transistor), MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor), GTO-tyristorit (Gate Turn-Off), MCT (MOS-Controlled Thyristor) ja IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) – komponentit. Tässä työssä tarkastellaan vain GTO- ja IGBT-komponentteja, sillä ne ovat taajuusmuuttajien kannalta merkittävimmät ja yleisimmät ohjattavat tehopuolijohteet. Kuvassa 2.12 on kuitenkin esitelty taajuusmuuttajissa yleisesti käytettyjen ohjattavien kytkinten tehonkesto- ja kytkentätaajuusrajoja. [7; 10]



**Kuva 2.12.** Ohjattavien tehopuolijohdekomponenttien tehonkesto- ja kytkentätaajuusvertailua.

## GTO-tyristori

GTO-tyristorit (Gate Turn-Off) voidaan kytkeä johtavaan tilaan lyhytkestoisella hilavirtapulssilla kuten tyristoritkin, ja ne pysyvät johtavassa tilassa vaikka hilavirta sammutetaan. Mutta toisinkuin tyristorit, GTO-tyristorit voidaan myös sammuttaa hilavirralla: tarvitaan verrattain suuri hila-katodi-virta mutta erittäin nopea (muutaman mikrosekunnin kestoinen ja noin  $1/3$  anodivirrasta) jotta GTO-tyristori saadaan off-tilaan. Kuvassa 2.13 on esitelty GTO-tyristorin yleisesti käytetty piirrosmerkki.

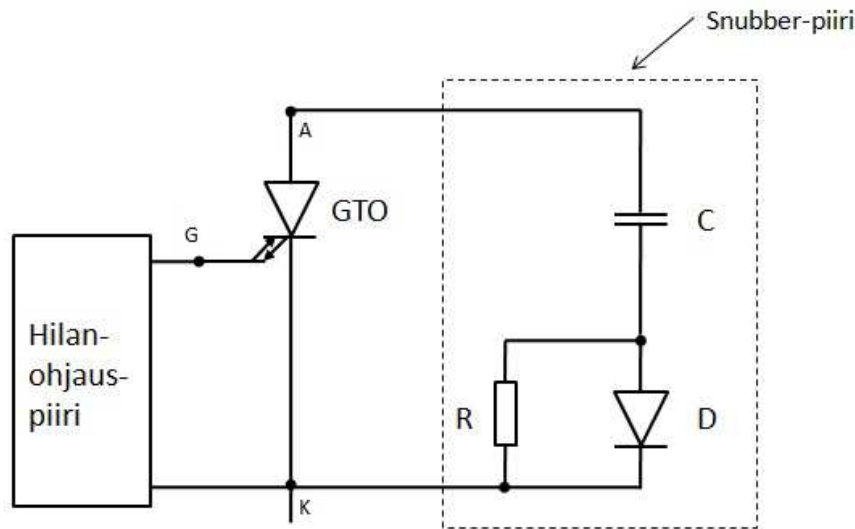


**Kuva 2.13.** *GTO-tyristorin piirrosmerkki.*

GTO-tyristori voi kestää myös negatiivisia jännitteitä, joiden suuruus riippuu GTO-tyristorin suunnittelusta. GTO-tyristorien johtavan tilan jännitehäviö (2 - 3 V) on hie-  
man suurempi kuin tyristoreilla. GTO-tyristoreilla voi olla suuri jännitteenkesto (jopa  
4,5 kV) ja suuri virrankesto (jopa muutamia tuhansia ampeereita) ja yleensä niitä käyte-  
tään taajuusmuuttajissa, joissa vaaditaan suurta jännitteen- ja virrankestoja kytkentäta-  
ajuuksien ollessa muutamista sadoista noin 1 kHz asti. GTO-tyristorien rinnalle pitää  
yleensä liittää niin sanottu snubber-piiri. [7; 10]

## Snubber-piiri

Snubber-piirejä käytetään vaimentamaan nopeita virran ja jännitteen nousuja induktiivista kuormaa sisältävissä elektronisissa piireissä. Virran nopea katkaisu aiheuttaa nopean jännitteen nousun, jonka snubber-piirissä oleva kondensaattori pyrkii tasaamaan. Snubber-piirejä on useita erilaisia ja ne on suunniteltava ja mitoitettava aina laitekohtaisesti. Kuvassa 2.14 (s. 14) on esitelty GTO-tyristorin rinnalle kytkettävä polaarinen RC-snubber-piiri.

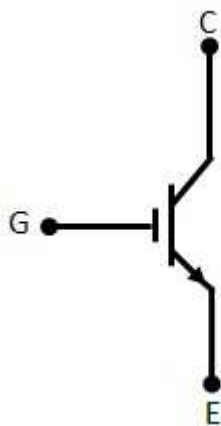


**Kuva 2.14.** Polaarinen RC-Snubber-piiri.

Kuvan 2.14 snubber-piirin idea on rajoittaa nopeita jännitteen nousuja poiskytkentähetkellä. Kun GTO-tyristori suljetaan, virran kulku lakkaa ja jännite nousee nopeasti suhteellisen korkeaksi, mikä voi vahingoittaa GTO-tyristoria ohjaavaa elektroniikkaa. Kuvan kondensaattori (C) pyrkii rajoittamaan jännitteen nousunopeuden sellaiseksi, ettei äkillisestä ja suunnittelemattomasta jännitteen noususta aiheudu haittaa hilan ohjauspiirille tai mahdollisille muille piirin kytkettäville komponenteille. Kuvan vastus (R) toimii kondensaattorin energian purkausvastuksena, ja se aiheuttaa häviöitä. [7; 2]

## IGBT

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) on nykyään yleisimmin käytetty kytkinkomponentti taajuusmuuttajissa. Kuvassa 2.15 on esitelty IGBT:n yleisesti käytetty piirrosmerkki.



**Kuva 2.15.** IGBT:n piirrosmerkki.

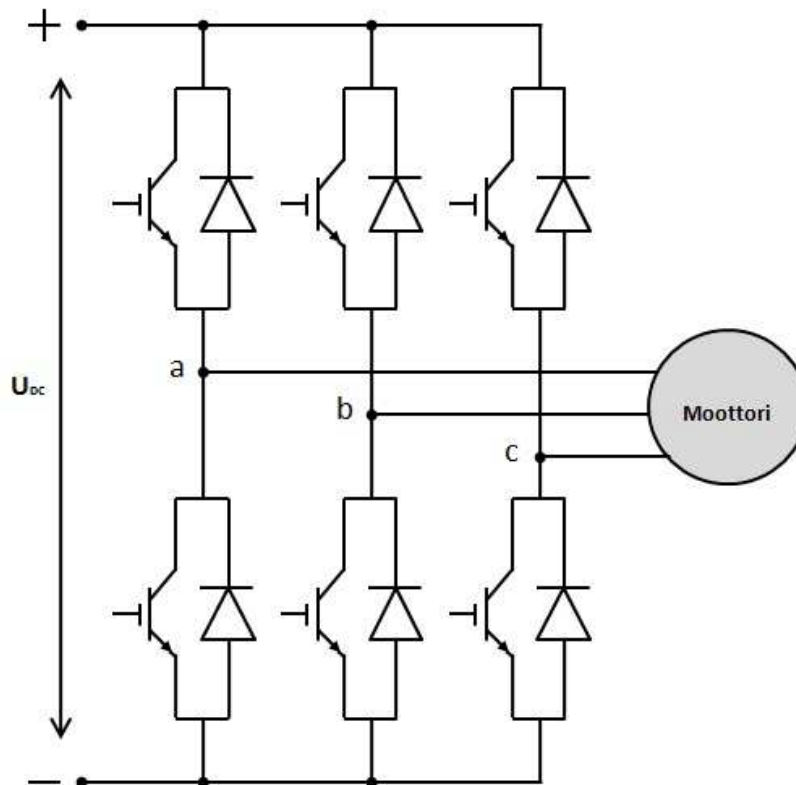
IGBT:ssä yhdistyy muutamia muiden ohjattavien tehopuolijohteiden hyvistä puolista: sillä on MOSFET:n tapaan suuri-impedanssinen hila (gate), joten tarvitaan vain vähän

energiaa, jotta IGBT saadaan johtavaan tilaan. Sillä on myös BJT:n tapaan pieni jännitehäviö johtavassa tilassa, mutta kuitenkin verrattain suuret jännitteen kestot myötä- ja vastasuuntaan. Esimerkiksi 1000 V jännitekestoisessa IGBT:ssä jännitehäviöt myötasuuntaan ovat johtavassa tilassa 2 - 3 V. GTO:n tapaan IGBT voidaan erikoistapauksessa suunnitella kestämaan suuria vastasuuntaisia jännitteitä.

IGBT:n on- ja off-tilojen kytkentäajat ovat nykyään noin viiden mikrosekunnin luokkaa. Niitä on saatavilla moduuleissa, jotka sisältävät esimerkiksi kuusi kappaletta IGBT-komponentteja. Moduulien jännitteenkesto voi olla jopa noin 6500 V ja virrankesto noin 3200 A. [7; 10; 25]

### IGBT-moduuli

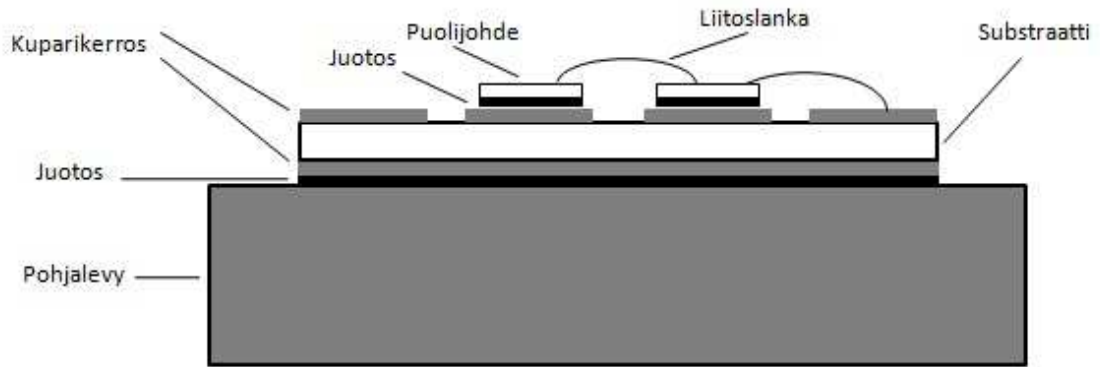
Taajuusmuuttajien nykyään useimmin käytetyt IGBT-vaihtosuuntaajat on toteutettu yhden tai useamman IGBT-moduulin avulla. Vaihtosuuntaaja koostuu vaihekohtaisten transistorien ja diodien siltakytkennästä (kuva 2.16).



**Kuva 2.16.** Periaatteellinen IGBT-vaihtosuuntaaja.

Moduulin suunnittelusta riippuen sillä voidaan toteuttaa joko yhden tai kaikkien kolmen vaiheen vaihtosuuntaus. Lämpötilan vaihtelut moduulin eri rajapintojen välillä aiheuttavat erisuuruisia lämpölaajenemisia ja sitä kautta myös erilaisia jännitys- ja puristustiloja eri moduulissa olevien materiaalien välille. Kuvassa 2.17 tarkastellaan IGBT-moduulin rakennetta kotelotasolla. [8]





**Kuva 2.17.** IGBT-moduulin rakenne.

Tehopuolijohteiden lämpeneminen ja jäähtyminen vaikuttavat suuresti koko moduulin lämpötilan vaihteluihin. Sekä moduulissa olevien diodien että IGBT-komponenttien tehohäviöt aiheuttavat lähes koko moduulin lämpötehon. IGBT:ssä tapahtuu neljää erityylistä tehohäviötä: kytkentä-, esto-, johto- ja ohjaushäviöitä. [8]

*Kytkehäviöt* johtuvat IGBT:n kytkemisestä johtavaan tai johtamattomaan tilaan. Näiden häviöiden suuruuteen vaikuttaa kytkentätaajuus ja -aika, puolijohteen lämpötila, kollektorin ja emitterin välinen jännite sekä kollektorivirta. *Estohäviöitä* syntyy kun IGBT on johtamattomassa tilassa, jolloin komponentin läpi kulkee pieni vuotovirta (10...100  $\mu\text{A}$ ). Estohäviöt voidaan laskea IGBT:n kokonaishäviöissä merkitykselliseksi. Kun IGBT on johtavassa tilassa, sen yli vaikuttaa päästöjännite, joka aiheuttaa *johtohäviöitä*. Päästöjännitteen suuruus riippuu puolijohdepalan lämpötilasta, IGBT:n sisäisestä vastuksesta, kollektorivirrasta sekä IGBT-alkion pn-liitoksen päästöjännitteestä. Yleisesti ottaen johtohäviöitä voidaan kuitenkin arvioida keskimääräisen virran ja jännitteen tulon avulla. IGBT:tä ohjattaessa sen hilakapasitanssi varautuu ja purkautuu, mistä aiheutuvat IGBT:n *ohjaushäviöt*. Kytkentätaajuuden kasvaessa myös ohjaushäviöt kasvavat. [8]

IGBT-moduulissa olevissa diodeissa syntyy myös tehohäviöitä: johtavan tilan tehohäviöitä sekä sammutuksesta aiheutuvia tehohäviöitä. Johtavan tilan tehohäviöihin vaikuttaa suhteellinen johto-aika, kuormavirta sekä puolijohdepalan lämpötila. Diodin sammutuksen tehohäviöihin vaikuttaa edellisten lisäksi vielä kytkentätaajuus, virran muutosnopeus sekä välipiirin jännite. [8]

Erilaiset kuormitustilanteet aiheuttavat IGBT-moduulin kannalta merkittävimmät lämpötilan muutokset, sillä IGBT-puolijohteen lämpötila vaihtelee silloin eniten. Joissain sovelluksissa kuormitus aiheuttaa sen, että moduulin pohjalevyn lämpötila  $T_c$  sekä puolijohteen lämpötila  $T_j$  vaihtelevat laajalla alueella. Moduulin lämpötilan vaihteluihin vaikuttavat IGBT- ja diodipuolijohdeiden lisäksi myös ympäristön lämpötila, moduulin jäähdytys sekä alumiiniliitoslankojen sisäinen resistanssi. [8]

Moduulin eliniän kannalta kriittistä on *lämpötilan vaihteluiden* minimoiminen. Yleisesti luullaan, että riittävä jäähdytys on tärkeintä IGBT:n eliniän kannalta, mutta se voi vain saada aikaan suuremman erotuksen maksimi- ja minimilämpötilojen välillä,

jolloin se saattaa enemmän rasittaa moduulia. Lämpötilan muutos on siis usein kriittisempi tekijä kuin moduulin absoluuttinen lämpötila, vaikkakin riittävän suuri lämpötila voi myös yksinään tuhota IGBT-moduulin. [8]

Moduulin virtakuormituksen muutoksesta aiheutunutta lämpötilan vaihtelua kutsutaan *tehosyklaukseksi*. Ympäristö- ja jäähdytysolosuhteiden muutoksista aiheutunut passiivinen lämpötilan vaihtelu taas tarkoittaa *lämpösyklausta*. Tehosyklauksta esiintyy useasti muun muassa kuljetin-, hissi- ja nosturikäytöissä, joissa tapahtuu paljon jarrutuksia ja kiihdytyksiä. Puolijohteiden lankaliitokset sekä substraatin ja puolijohteen välinen liitos voi kärsiä tehosyklauksesta lyhyidenkin sykliakojen tapauksessa, sillä puolijohteen lämpötila kasvaa kuormitustilanteessa selvästi pohjalevyn lämpötilaa nopeammin. Tehosyklaus saattaa olla erittäin voimakasta pienillä lähtötaajuuksilla, sillä virta kulkee suhteellisesti kauan yksittäisen tehopuolijohteen läpi, mikä taas kasvattaa puolijohteen lämpötilaa voimakkaasti. Sen jälkeen seuraa aika, jolloin puolijohde on johtamattomassa tilassa, jolloin se pääsee taas jäähtymään. Tehosyklauksta saattaa siis ilmetä, vaikka taajuusmuuttajan virran tehollisarvo olisikin tasaisen näköistä.

Koska moduulin eri materiaaleilla on erilaiset lämpölaajenemiskertoimet, nimenomaan lämpötilan vaihtelut aiheuttavat vaurioita moduuleissa. Kappaleen laajeneminen riippuu materiaalille ominaisesta lämpölaajenemiskertoimesta, kappaleen pituudesta sekä lämpötilan muutoksesta kaavan (3) osoittamalla tavalla. [8]

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \quad (3)$$

jossa  $\Delta l$  = kappaleen pituuden muutos  
 $\alpha$  = kappaleelle ominainen lämpölaajenemiskerroin  
 $l_0$  = kappaleen alkuperäinen pituus  
 $\Delta T$  = lämpötilan muutos

Materiaalin lämpölaajeneminen on usein estetty liittämällä laajeneva materiaali kiinni sitä jäykempään materiaaliin. Tämä taas aiheuttaa veto- ja puristusjännityksiä, joiden suuruus riippuu lämpötilan muutoksesta, aineen kimmokertoimesta ja lämpölaajenemiskertoimesta kaavan (4) osoittamalla tavalla. [8]

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (4)$$

jossa  $\sigma$  = puristusjännitys  
 $\alpha$  = kappaleelle ominainen lämpölaajenemiskerroin  
 $E$  = kappaleelle ominainen kimmokerroin  
 $\Delta T$  = lämpötilan muutos

Jos materiaali altistuu vaihteleville jännitykselle ja niistä palautumisille toistuvasti, voi materiaali väsyä ja murtua. Tällaista tapahtuu myös IGBT-moduulissa lämpötilan vaihtelun seurauksena.

Lämpötilan vaihtelusta aiheutuvat vauriot voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: liitoslankavaurioihin sekä juotosvaurioihin. Puolijohteeseen kohdistunut lämpötilan vaihtelu saa aikaan siihen kiinnitetyn liitoslangan liikkumisen ja jännityksen syntymisen langan ja puolijohteen väliseen liitokseen. Juotosvaurioita taas aiheutuu lämpötilan vaihtelun seurauksena erilaisten materiaalien rajapintaan, joissa on juotosliitos. [8]

### IGBT-moduulin eliniän ennustaminen

Taajuusmuuttajien käyttövarmuuden, luotettavuuden ja huollettavuuden kannalta olisi toivottavaa, että taajuusmuuttajat osaisivat itse arvioida komponenttien ikääntymistä ja milloin huoltoja tulisi suorittaa. Näin huollot voitaisiin suunnitella ja aikatauluttaa niin, ettei yllättäviä käyttökatkoja esiintyisi. Ennakoivat huollot olisivat myös edullisempia suorittaa ja ne vaikuttaisivat positiivisesti asiakastyytyväisyyteen.

IGBT-moduulin ikääntymisistä aiheutuvia vikoja on selvitetty ja niiden eliniän ennustamiseen on kehitelty menetelmiä. IGBT-moduulin tapauksessa yleisimmät viat ovat moduulin eri materiaalien välinen delaminaatio sekä liitoslankojen irtoaminen. Pohjalevyn ja substraatin välinen liitos toimii moduulin ensisijaisena lämmönsiirtoreitinä, joten sen murtuminen vaikuttaa lämmönsiirtovastukseen  $R_{th}$ . Liitoslankojen irtoaminen taas vaikuttaa päästötilan jännitteeseen  $V_{ce\_sat}$ , koska silloin toimivien liitosten määrä on pienempi ja virralla on vähemmän kulkureittejä. Standardi MIL-STD-19500 määrittelee komponentin eliniän päättyneeksi jos lämmönsiirtovastuksen  $R_{th}$  tai päästötilan jännite  $V_{ce\_sat}$  ylittää 20 prosentilla alkuperäisen arvonsa. Eliniän ennustaminen tulisi siis pohjautua näihin vikamekanismeihin. [8]

Teollisuudessa kyseisten suureiden mittaaminen vaadittavalla tarkkuudella on käytännössä hyvin hankalaa. Lisäksi vikaantumisen alkaessa monitoroitavat suureet muuttuvat hyvin nopeasti, sillä yleisimmät vikaantumismekanismi ovat luonteeltaan kiihtyviä. Tämän vuoksi eliniän ennustaminen tulisi perustua IGBT-moduulin lämpökuormituksen seuraamiseen. Myös kokeellisesti määritettävien parametrien avulla tulisi kehittää malleja yleisimpien vikamekanismien yhä tarkempaan kuvaamiseen. Kun tiedetään moduulin kuormituksen vaikutukset vauriomekanismien syntyyn ja etenemiseen sekä tiedetään kuormitushistoria, voidaan ennustaa moduulin loppuelinikä.

Yleisimpiä vauriomekanismeja voidaan mallintaa teoreettisilla yhtälöillä, jotka ottavat huomioon lämpötilan vaihteluiden suurimman sallitun syklimäärän sekä absoluuttisen lämpötilan vaikutukset puolijohteen elinikään. Ottamalla huomioon myös yksittäisen liitoslangan läpikulkevan virran ( $I_b$ ) sekä kuormitusjakson pituuden ( $t_{on}$ ), voidaan mallinnuksen tarkkuutta parantaa. Jotkut IGBT-moduuleiden valmistajat antavat kuitenkin syklikestoituskäyriä eri lämpötilavaihteluiden arvoille. Voidaan olettaa, että nämä teorian ja käytännön kokeiden avulla muodostetut kuvaajat ottavat vauriomallit huomioon riittävällä tarkkuudella, ja että näin taajuusmuuttajan IGBT-moduulin vikaantumishetken ennustaminen on mahdollista. [8]

Vauriofunktio  $Q(t)$  (5) voidaan määrittää, kun tiedetään tarkasteluajana  $t_i$  toteutunut syklimäärä mielivaltaisella lämpötilanmuutoksen arvolla  $N(\Delta T)$  sekä suurin sallittu syklimäärä lämpötilanmuutoksen arvolla  $N_f(\Delta T)$ :

$$Q(\Delta T) = \frac{N(\Delta T)}{N_f(\Delta T)} \quad (5)$$

Kun tarkasteluajana toteutunut syklimäärän arvo saavuttaa suurimman sallitun arvon, voidaan komponentin elinikä ennustaa päättyneeksi. Todellisuudessa IGBT-moduulit noudattavat Weibull-jakaumaa, eli vikaantumisen todennäköisyys lämpötilan vaihteluiden seurauksena kasvaa syklimäärän kasvaessa.

IGBT-moduulin kokema lämpökuormitus koostuu todellisuudessa useasta eri lämpötilanvaihtelun  $\Delta T$  arvosta. Näitä erilaisia lämpötilan vaihteluita esiintyy tietty määrä tarkasteluajana ja ne kaikki lisäävät vaurioitumisen todennäköisyyttä sekä vähentävät osaltaan laitteen elinikää. Mitä suurempi lämpötilan vaihtelu  $\Delta T$  on, ja mitä enemmän syklejä kyseisellä lämpötilan vaihtelulla tapahtuu, sitä suurempi painoarvo sillä on kokonaisvauriofunktiossa  $Q_{tot}$ . Vikaantumishetken määrittämisessä voidaan olettaa, että erisuurten  $\Delta T$ :n omaavat syklit summautuvat toisiinsa kaavan (6) mukaisesti. [8]

$$Q_{tot} = \sum_{i=1}^n \frac{N(\Delta T_i)}{N_f(\Delta T_i)} \quad (6)$$

Jos oletetaan, että moduulin kuormitus pysyy samana koko sen eliniän ajan, voidaan sen eliniälle esittää ennuste tarkasteluajan ja vauriofunktion arvon suhteena kaavan (7) mukaisesti. [8]

$$t_{elinikä} = \frac{T_t}{Q_{tot}} \quad (7)$$

Jossa  $T_t$  = tarkastelu aika

$Q_{tot}$  = kokonaisvaurio

#### 2.1.6. Elektrolyyttikondensaattorit

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan välipiirissä on suuria elektrolyyttikondensaattoreita, jotka toimivat välipiirissä energiavarastoina. Myös taajuusmuuttajan piirikorteilla on elektrolyyttikondensaattoreita, jotka toimivat jännitteen suodattajina, eli tasoittavat tasajännitteessä olevia vaihtojännitekomponentteja ja tekevät näin tasajännitteestä entistä tasaisempaa.

Elektrolyyttikondensaattorit muodostuvat alumiinifoliosta ja paperista, jotka on asetettu päällekkäin ja kääritty rullalle. Rullassa on kaksi erillistä alumiinifoliota, joista toisen pintaan on elektrolyyttisesti synnitetty ohut alumiinioksidikerros. Tämä folio toimii kondensaattorin positiivisena elektrodina (anodina) ja sen oksidikerros toimii kondensaattorin eristeenä. Rullassa oleva paperi on kyllästetty elektrolyyttiliuoksella, jonka kanssa toinen alumiinifolio muodostaa kontaktin. Tämä pari toimii kondensaattorin negatiivisena elektrodina (katodina). Kuvassa 2.18 on esitelty tyypillinen tehoelektroniikassa käytetty elektrolyyttikondensaattori. Kotelon kannessa (pohjassa) ovat alumiiniset liittimet, jotka ovat yhteydessä rullassa oleviin alumiinifolioihin (anodiin ja katodiin).



**Kuva 2.18.** Tyypillinen tehoelektroniikan sovelluksissa käytetty elektrolyyttikondensaattori

Alumiinifolioiden pinnasta on tehty sienimäinen, jotta sen pinta-alasta saataisiin mahdollisimman suuri. Tämä ja eristekerroksen ohuus mahdollistavat elektrolyyttikondensaattoreille tyypillisen suuren kapasitanssin niiden fyysiseen kokoon nähden. Elektrolyyttikondensaattorit ovat yleensä polaarisia, eli ne eivät kestä yleensä yli 1 V negatiivista jännitettä, sillä silloin elektrolyyttisen prosessin suunta muuttuu ja anodifolion oksidikerros alkaa heikentyä. Oksidikerroksen heikentyessä vuotovirta kasvaa nopeasti, mikä aiheuttaa häviötehoa ja ylipainetta kotelon sisään. Tämän seurauksena elektrolyyttikondensaattori voi räjähtää. Siksi elektrolyyttikondensaattoreiden navat ovat aina merkitty, eikä niitä voida käyttää sovelluksissa, joissa jännitteen polariteetti voi muuttua. Suurimmissa elektrolyyttikondensaattoreissa voi olla ylipaineventtiili, joka suojaa kondensaattoria räjähtämiseltä (kuva 2.18).

Elektrolyyttikondensaattorin tyypillinen elinikä on noin 20 000 tuntia (60 °C lämpötilassa). Se on voimakkaasti riippuvainen sen käyttölämpötilasta sekä napojen yli olevasta jännitteestä. Käyttöikä kaksinkertaistuu jokaista 7 - 10 asteen lämpötilan alenemista kohden. Elektrolyyttikondensaattorin vuotovirta kasvaa lämpötilan kasvaessa, mikä kiihdyttää kuivumista eli elektrolyytin haihtumista. Tämä aiheuttaa kondensaattorin kapasitanssin pienenemistä ja sisäisen sarjaresistanssin eli ESR:n kasvua, mikä edelleen kiihdyttää kondensaattorissa tapahtuvia tehohäviöitä ja lämpötilan nousua. Tämän vuoksi elektrolyyttikondensaattorin elinikä on rajallinen.

Jos elektrolyyttikondensaattori on pitkään jännitteettömänä, sen eristemateriaalina toimiva oksidikerros heikkenee ja vuotovirta kasvaa. Jos oksidikerros pääsee katoamaan kokonaan, voi elektrolyytin läpi päästä kulkemaan virtaa, mikä aiheuttaa elektrolyytin höyrystymisen. Tämän vuoksi elektrolyyttikondensaattoreita ei suositella pidettävän pitkään jännitteettömänä ja varastoitaessa niitä täytyy säännöllisin väliajoin elvyttää, eli kytkeä elektrolyyttikondensaattorin napojen välille sopiva jännite. Elektrolyytti-

kondensaattorit kestävät usein suuria myötäsuuntaisia jännitteitä verrattuna muihin kondensaattorityyppeihin. [10; 11; 12; 13]

## 2.2. Mekaaninen rakenne

Taajuusmuuttajan mekaaniselta rakenteelta ja osilta vaaditaan sovelluksesta ja ympäristöolosuhteista riippuen erilaisia ominaisuuksia. Joiltakin osilta vaaditaan hyvää lämmön- tai sähkönjohtavuutta (tai -eristyskykyä) ja toisilta taas hyvää mekaanista lujuutta tai värinänsietokykyä. Joidenkin osien täytyy omata hyvä kemiallinen kestävyys ja korroosion kesto. Elektroniikkapiirien täytyy olla hyvin EMC-suojattuja. Taajuusmuuttajan kokonaisluotettavuutta suunniteltaessa täytyy siis kiinnittää huomiota myös osien materiaalivalintoihin tai erilaisiin rakenteellisiin ratkaisuihin.

### 2.2.1. Kotelointi ja IP-luokat

Tuotteen IP-luokka (International Protection) on Euroopassa käytettävä järjestelmä, joka kertoo sähkölaitteen tiiviyn ulkoisia uhkia kuten vettä ja pölyä vastaan. IP-luokitus on määritelty standardissa IEC 60529. IP-koodi koostuu kahdesta numerosta ja vapaaehtoisista kirjainmerkinnöistä. Ensimmäinen numero kertoo laitteen suojauskyvyn esineitä ja pölyä vastaan, ja toinen numero suojaustason vettä ja kosteutta vastaan. Seuraavaksi esitellään IP-numeroiden merkitykset:

#### **Ensimmäinen numero (vieraat esineet ja pöly):**

0 Suojaamaton

1 Esineen halkaisija on yli 50 mm

2 Esineen halkaisija on yli 12,5 mm

3 Esineen halkaisija on yli 2,5 mm

4 Esineen halkaisija on yli 1,0 mm

5 Pölysuojattu

6 Pölytiivis

#### **Toinen numero (vesi ja kosteus):**

0 Suojaamaton

1 Pystysuoraan tippuvalta vedeltä

2 Tippuvalta vedeltä (+/- 15 astetta)

3 Satavalta vedeltä (+/- 60 astetta)

4 Roiskuvalta vedeltä

5 Vesisuihkulta (joka suunnasta)

6 Voimakkaalta vesisuihkulta

7 Lyhytaikaisesti upotettuna

8 Jatkuvasti upotettuna

IP-koodissa voi olla myös lisä- ja täydentäviä kirjaimia, joilla on omat merkityksensä:

**Lisäkirjain** (Vaaralliset osat ovat suojattu):

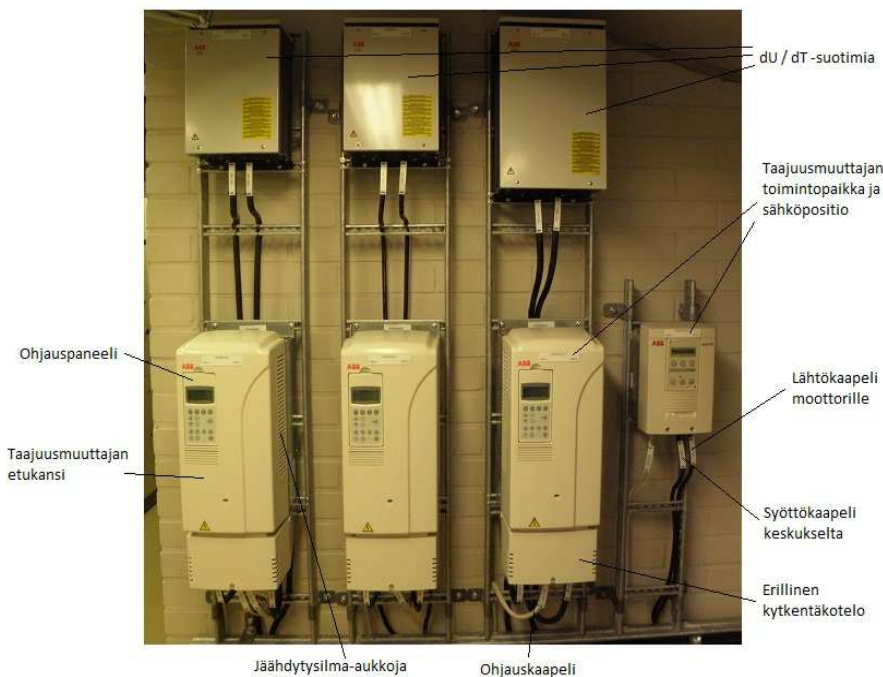
- A nyrkiltä
- B sormelta
- C työkalulta
- D langalta

**Täydentävä kirjain:**

- H Suurjännitelaitte
- M Vesisuojaus koestettu (laite käynnissä)
- S Vesisuojaus koestettu (laite pysähdyksissä)
- W Laite on koestettu erityisiin sääolosuhteisiin

Aikaisemmin on käytetty myös kolmatta numeroa, joka on ilmaissut laitekotelon mekaanista kestävyyttä. Nykyään kotelon mekaaninen iskunkesto ilmoitetaan erikseen IK-luokkana standardin IEC 62262 mukaisesti.

Taajuusmuuttajissa yleisesti käytetyt suojaluokat on IP21 ja IP54. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että mitä suuremmat numerot koodissa on, sitä parempi suojaustaso laitteella on. Kuvassa 2.19 on esitelty paperitehtaan puhtaaseen ja viileään sähkötilaan asennettuja IP21-suojaluokan taajuusmuuttajia.



**Kuva 2.19.** IP21-koteloituja taajuusmuuttajia sähkötilaan seinäasennettuina.

Suojausluokan IP21 numeroiden määritelmät menevät seuraavasti:

**IP21:** mekaaninen suojaus suuria kappaleita vastaan (halkaisija yli 50 mm) ja suojaa pystysuoraan tippuvalta vedeltä.

Kuvassa 2.20 on esitelty yleisesti teollisuudessa käytetty koteloinnin suojausluokka IP54. Näitä paremmin suojattuja taajuusmuuttajia käytetään, jos taajuusmuuttajaa ei voida asentaa sähkötilaan, vaan se joudutaan asentamaan työkoneneen viereen kentälle epäpuhtaisiin olosuhteisiin.



**Kuva 2.20.** IP54-koteloituja taajuusmuuttajia kenttäolosuhteisiin asennettuna.

Suojausluokan IP54 numeroiden määritelmät menevät seuraavasti:

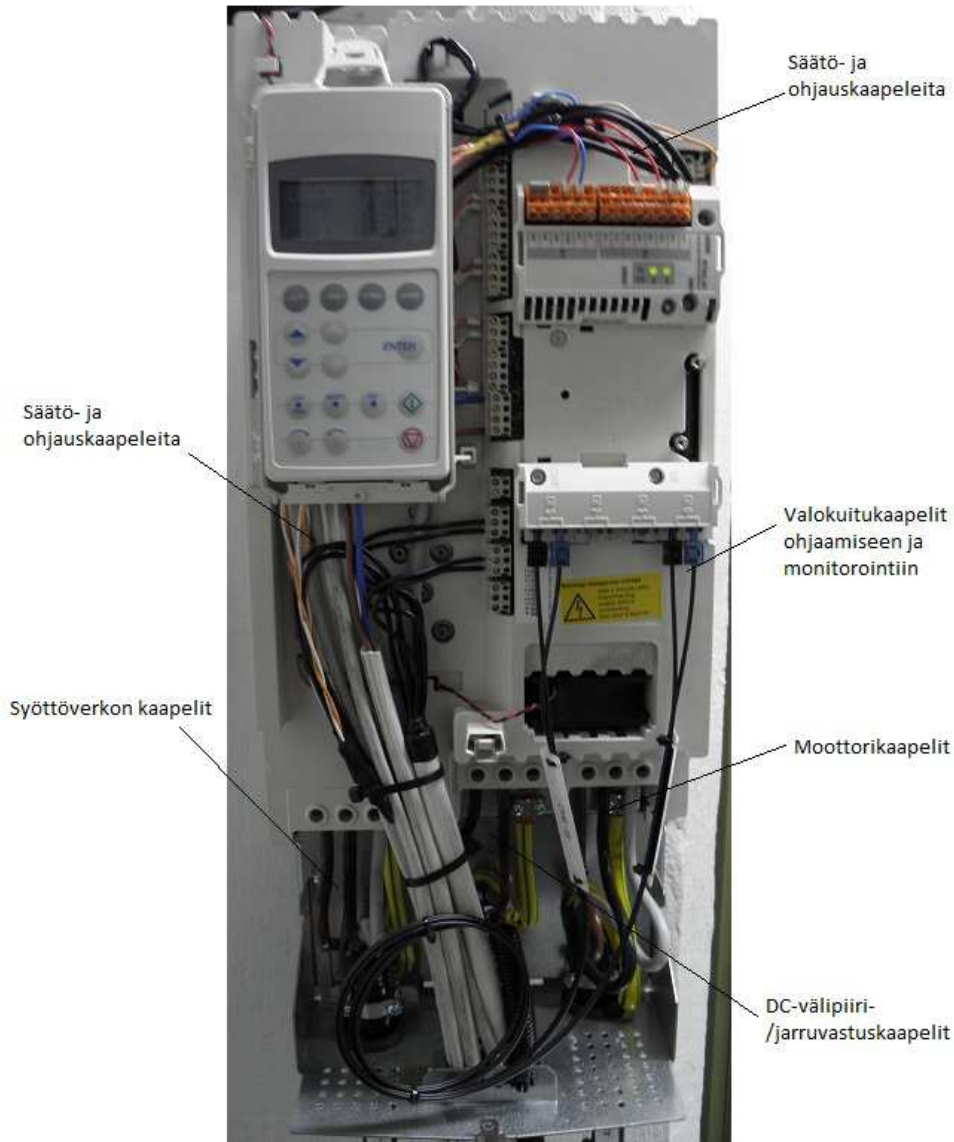
**IP54:** laite on suojattu pölyltä (ei täydellisen pölytiivis, mutta haitallisia pölykertymiä laitteen sisälle ei saa kertyä) ja roiskuvalta vedeltä.

Usein asiakkaan asettamissa laitevaatimuksissa tai asennusmääräyksissä voidaan käyttää IP-koodin numeroiden tilalla kirjainta X, joka tarkoittaa ettei esimerkiksi pölyn-suojauksessa ole asetettu erillistä vaatimustasoa. Usein vesisuojausta parannettaessa myös suojaus pölyä vastaan paranee. [14]



### 2.2.2. Liitännät

Taajuusmuuttajaan liitetään asennuksen yhteydessä erilaisia kaapeleita, joita on esitelty kuvassa 2.21. Taajuusmuuttajaan liitetään yleensä ainakin syöttöverkon kaapeli ja moottorikaapeli. Tällöin taajuusmuuttajaa voi käyttää ainoastaan sen oman ohjauspaneelin avulla. Usein taajuusmuuttajia kuitenkin etäohjataan, jolloin taajuusmuuttajaan voidaan kytkeä lisäksi erilaisia ohjauskaapeleita. Tarvittaessa myös jarruvastus voidaan kytkeä välipiirin tasajännitekiskoihin.



**Kuva 2.21.** Taajuusmuuttajan kaapeliliitännät.

Taajuusmuuttajan liitännöjen toteutus ja määrä voi vaihdella eri aikakausien taajuusmuuttajamalleissa. Mitä enemmän irrotettavia liittimiä on, sitä suurempi todennäköisyys on myös niiden vikaantumiseen iän myötä. Kuvassa 2.21 näkyvät paksut syöttöverkon, DC-välipiirin/jarruvastuksen sekä moottorille lähtevät kaapelit, joiden kytkemiseen käytetään aina ruuviliitoksia. Ruuviliitokset täytyy kiristää valmistajan käyttöohjeessa il-

moitettuun vääntömomenttiin ja kaapeleiden päissä pitää käyttää oikean kokoisia kaapelikenkiä. Laitepäivityksen tai hajoamistapauksen yhteydessä joudutaan joskus irrottamaan myös ohjauskaapeleita, joiden uudelleen kytkeminen täytyy tehdä erityistä huolellisuutta noudattaen ja liittimien kunto tulee tarkistaa.

### 2.2.3. Taajuusmuuttajan jäähdytys

Suurin osa taajuusmuuttajista on varustettu jäähdytyspuhaltimilla. Jäähdytyspuhaltimet ovat sijoitettu niin, että taajuusmuuttajaan virtaa ympäröivää ilmaa yleensä kotelon alapuolelta ja ilmavirta poistaa lämpöä komponenttien pinnoilta ja jäähdytyspinnolta. Lämminnyt ilma virtaa ulos taajuusmuuttajasta yleensä kotelon yläpuolelta. Jäähdytyspuhaltimilla toteutettua jäähdytystä käytetään yleisesti pienemmän suojausluokan malleissa (IP2X). Jäähdytyspuhaltimet kuuluvat yleensä taajuusmuuttajan vakiovarusteisiin ja niihin on saatavilla lisäoptiona myös lisäjäähdytyspuhallin.

Suuremman suojausluokan taajuusmuuttajissa (IP54) käytetään useasti isoja jäähdytyslementtejä, jotka johtavat lämmön ilmatiiviisti kotelon sisältä kotelon ulkopuolelle. Osaan suuremman suojausluokan taajuusmuuttajiin on mahdollista saada myös nestejäähdytys, jossa kotelon sisällä oleva lämpö sidotaan muoviputkissa kiertävään nesteeseen ja johdetaan kotelon ulkopuolelle. Nestettä kierrätetään putkistossa erillisen moottorin avulla, joka aiheuttaa myös pienen epävarmuustekijän ja huoltokohteen taajuusmuuttajan luotettavuudessa. Nestejäähdytys voi kuitenkin usein olla hyvä vaihtoehto taajuusmuuttajan jäähdyttämiseen.

### 3. TAAJUUSMUUTTAJAT TEOLLISUUDESSA

Taajuusmuuttajien määrä teollisuudessa on ollut kasvussa 80-luvulta lähtien. Taajuusmuuttajia on teollisuudessa ainakin kolmesta eri syystä:

1. Energiansäästö
2. Moottorin huollontarpeen vähentäminen (DC-käytöistä siirtyminen taajuusmuuttajaohjattuun oikosulkumoottorikäyttöön)
3. Käytön sulavuuden parantaminen (esimerkiksi kuljettimet saadaan lähtemään hitaasti kiihtyen liikkeelle, mikä säästää mekaanisia osia)

#### 3.1. Sovelluskohteet

Paperitehtaat ovat hyvä toimintaympäristö tutkia taajuusmuuttajien luotettavuutta. Tehtaat ovat täynnä moottoreita, jonka vuoksi niissä on nykyään myös paljon taajuusmuuttajia. Paperitehtaalla taajuusmuuttajia on ainakin seuraavissa sovelluksissa:

- Pumppukäytöt
- Puhallinkäytöt
- Kuljetinkäytöt
- Nosturikäytöt
- Hissikäytöt
- Erilaiset sekoitinlaitekäytöt
- Paperikoneiden pituusleikkureiden terä- ja asemien siirto -käytöt
- Sellu- ja hierrejauhien terävalinsäätökäytöt
- Turpeen ja hieteen ruuvi- ja kolapurkainkäytöt
- Paperikoneen päänvientikuljetinkäytöt
- Ruuvi- ja viirapuristinkäytöt
- Paljon tarkkuutta vaativat telakäytöt, esimerkiksi paperikoneen pituusleikkurin painotela.

Suurin osa sovelluksista on taajuusmuuttajakäyttöisiä energiankulutuksen säästösyistä. Esimerkiksi tehdassalin ilmastointipuhaltimet säästävät taajuusmuuttajakäyttöisinä paljon energiaa, kun niiden virtausta voidaan säädellä salin lämpötilan mukaan, eivätkä ne käy koko aikaa vakionopeudella. Osa käytöistä käy käytännössä koko ajan prosessin ollessa käynnissä ja taajuusmuuttajien avulla säädetään vain sovelluksen moottorin pyörimisnopeutta. Toisissa käytöissä pysäytyksiä ja käynnistyksiä tulee niin usein, että niiden kiihdytyksiä ja jarrutuksia on hyvä pehmentää taajuusmuuttajan avulla. Esimerkiksi

hisseissä käytetään taajuusmuuttajia, jotta liikkeelle lähtö ja pysäytys olisivat mahdollisimman pehmeitä.

### 3.1.1. Sykliset taajuusmuuttajakäytöt

IGBT:n jaksollisen kuormitusvirran vaihtelun aiheuttamaa IGBT-moduulin pohjalevyn ja puolijohteen välistä lämpötilanvaihtelua kutsutaan tehosyklaukseksi. Ympäristö- ja jäähdytysolosuhteiden vaihtelusta aiheutuvalla passiivisella lämpötilan vaihtelulla taas tarkoitetaan lämpösyklausta. Tehosyklausta esiintyy paperitehtaalla muun muassa erilaisten telojen käytöissä sekä kuljetin-, nosturi-, hissikäytöissä. Tehosyklausta esiintyy siis käytöissä, jossa on paljon sellaisia jarrutuksia ja kiihdytyksiä, että virran nopea muutos aiheuttaa lämpötilan nopeita muutoksia IGBT-moduuleissa. Koska IGBT-moduulissa puolijohde ja pohjalevy ovat eri materiaaleista, niin kuormitustilanteessa puolijohteen lankaliitokset sekä substraatin ja puolijohteen väliset liitokset saattavat kärsiä tehosyklauksesta lyhyenkin kuormitus- tai jarrutusjakson aikana.

## 3.2. Mitoitussäännöt

Laitevalmistajien käyttöoppaissa on omat suosituksensa taajuusmuuttajien mitoittamiseen. Paperitehtaalla pumppu- ja puhallinkäytöt ovat pääasiassa mitoitettu raskaan käytön mukaan, missä moottorin sallittu virta,  $I_{\text{high-overload}}$ , toteutuu korkeintaan 1 min ajan ja 5 min välein, 40 °C lämpötilassa.

$$I_{\text{high-overload}} = 1,5 \cdot I_{\text{nim}} \quad (8)$$

jossa  $I_{\text{nim}}$  tarkoittaa taajuusmuuttajan ohjaaman moottorin nimellisvirtaa.

Muut sovellukset on mitoitettu yleensä normaalin käytön mukaan kaavan (12) mukaisesti, missä moottorin sallittu virta,  $I_{\text{low-overload}}$ , toteutuu korkeintaan 1 min ajan ja 5 min välein, 40 °C lämpötilassa.

$$I_{\text{low-overload}} = 1,1 \cdot I_{\text{nim}} \quad (9)$$

Mitoitussäännöt ovat kuitenkin vain suuntaa-antavia, ja usein niissä tehdään tapauskohtaisia poikkeuksia taajuusmuuttajan sovelluksesta riippuen.

## 3.3. Ympäristöolosuhteet

Taajuusmuuttajat suositellaan asennettavaksi standardin mukaiseen sähkötilaan. Laitevalmistajat antavat kuitenkin usein käyttöohjeissaan vaatimukset ympäristön lämpötilalle.

Jos taajuusmuuttajat asennetaan kuivaan, puhtaaseen ja suhteellisen viileään sähkötilaan, sille riittää kotelointiluokaksi IP21. Joskus taajuusmuuttaja voidaan joutua

asentamaan erikoisolosuhteisiin, esimerkiksi ulos, jolloin taajuusmuuttaja olisi suositeltavaa tilata suuremmalla koteloinnin suojausluokalla. Paperitehtaalla lähes kaikki taajuusmuuttajat on asennettu sähkötiloihin ja niiden kotelointiluokaksi on valittu IP21. Diplomityön kohdeyrityksen paperitehtailla on muutama suuremman suojausluokan omaava taajuusmuuttaja, koska taajuusmuuttajat on jouduttu asentamaan epäpuhtaisiin olosuhteisiin lähelle työkonetta. Löytyi myös tapaus, jossa taajuusmuuttajaan oli pitänyt valita suurempi IP-luokka sähkötilan mittojen vuoksi, koska taajuusmuuttajan poistopuhaltimien tuottama ilmavirtaus täytyi kyseissä tapauksessa saada lähtemään taajuusmuuttajan kotelosta suoraan ylöspäin, eikä se ollut mahdollista IP21-koteloissa.

### 3.3.1. Lämpötila

Taajuusmuuttajan päävirtapiirin tehokomponenttien epäideaalisuuksien vuoksi syntyy paljon tehohäviöitä, jotka muuttuvat lämmöksi. Tavallisesti noin kaksi prosenttia taajuusmuuttajan nimellistehosta muuttuu lämmöksi. Pääpiirin tehokomponenttien jäähdytys tapahtuu pääasiallisesti kytkemällä tehokomponenttien tai -moduulien pohjat jäähdytysriipaan, jonka avulla lämpö johdetaan taajuusmuuttajan ulkopuolelle. Taajuusmuuttajan piirikorteissa syntyvät lämpöhäviöt ovat tavallisesti kymmenien wattien luokkaa, ja korttien jäähdytys tapahtuu ensin passiivisesti taajuusmuuttajan sisäilmaan, ja sieltä jäähdytyspuhaltimien avulla ympäristön ilmaan. Taajuusmuuttajan jäähdytys tapahtuu sitä tehokkaammin, mitä suurempi lämpötilaero ympäristön ja taajuusmuuttajan sisälämpötilan välillä vallitsee. Pienten taajuusmuuttajien välipiirikondensaattorien rungot on usein upotettu jäähdytettävään runkoon, jotta jäähdytys olisi riittävää. Koska pääpiirin tehokomponenttien lämpöhäviöt johdetaan myös jäähdytysriipojen kautta metallirunkoon, voi kuormitustilanteessa välipiirin elektrolyyttikondensaattoreiden lämpötila nousta yhteisen lämpöä johtavan rakenteen vuoksi suuremmaksi kuin kondensaattoreiden sähköinen toimintapiste edellyttäisi.

Taajuusmuuttajan ympäristöolosuhteiden lämpötila vaikuttaa muun muassa korroosioon, ja sitä kautta taajuusmuuttajan ikääntymiseen ja luotettavuuteen. Jäähdytyspuhaltimien ja elektrolyyttikondensaattoreiden käyttöikä on verrannollinen niiden käyttölämpötilaan. Kun lämpötila kohoaa, pääpiirin elektrolyyttikondensaattoreiden kapasitanssi pienenee ja niiden sisäinen sarjaresistanssi (ESR) suurenee, jolloin tehoa hukkuu enemmän lämmöksi. Tämä saattaa johtaa juurisyyinä koko komponentin ja lopulta koko laitteen hajoamiseen.

Ympäristön lämpötila tulisi olla laitteiden suunnitteluspeksien rajoissa. Laitteiden käyttölämpötilarajat selviävät yleensä laitteiden käyttöohjeista. Lämpötilan alarajana pidetään yleensä  $-10...0\text{ °C}$  elektroniikkapiirien sähköisen toiminnan sekä kosteuden tiivistymisen eli kondensoitumisilmiön takia. Ylärajana pidetään mallista riippuen  $40...50\text{ °C}$ . [15; 16; 17; 18]

### 3.3.2. Ilmankosteus

Taajuusmuuttajan toimintopaikan ilman suhteellinen kosteus on erittäin merkittävä tekijä sähköisten osien ikääntymisessä. Suuri ilman suhteellinen kosteus voi tiivistyä kylmänä olevien komponenttien pinnoille. Paperikoneiden seisokeissa paperinvalmistusprosessi on pysähdyksissä, laitteet ovat sähköttöminä ja komponentit kylmiä. Ennen käynnistystä tiivistynyt kosteus voi aiheuttaa oikosulkuja ja muuta epätoiminnallisuutta.

Ilman suhteelliseen kosteuteen (*RH*, Relative Humidity) vaikuttavat ilman absoluuttinen kosteus ja ilmamassan tilavuus kaavan (10) esittämällä tavalla:

$$RH = \frac{\text{ilman absoluuttinen kosteus } [\frac{g}{m^3}]}{\text{kyllästyneen vesihöyryn tiheys } [\frac{g}{m^3}]} \cdot 100 \% \quad (10)$$

Koska ilman tilavuus muuttuu lämpötilan muuttuessa, myös lämpötila vaikuttaa suhteelliseen kosteusprosenttiin. Lämpötilan noustessa ja absoluuttisen kosteuden pysyessä vakiona suhteellinen kosteusprosentti laskee.

Kosteus ja lämpötila aiheuttavat korroosiota niin, että korroosio on voimakkaampaa kosteissa ja lämpimissä olosuhteissa. Yli 50 prosentin suhteellinen kosteus kiihdyttää korroosiota huomattavasti. Koska taajuusmuuttajassa jäähdytysilma otetaan laitteen ulkopuolelta, tulisi laitteen komponenttien olla jäähdytysilmaa 10 - 20 astetta lämpimämpiä, ettei jäähdytysilman kosteus tiivistyisi komponenttien pinnoille. Jos jäähdytysilma pääsee kosketuksiin taajuusmuuttajan lämpöä tuottamattomia pintojen kanssa, on niillä suurempi mahdollisuus altistua korroosion kehittymiselle. Taajuusmuuttajassa kyseiset pinnat tarkoittavat metalliosia, joissa ei liiku suuria tehoja, eivätkä ne lämpene paljoa. Piirikorttien juotokset ja pinnat, riviliittimet ja muut sähköiset kontaktipinnat sekä jäähdytyspuhaltimet ovat lämpöä tuottamattomia pintoja. [18]

Koska nykyisten taajuusmuuttajien fyysinen koko ja sitä myötä johdinten eristysvälit ovat pienentyneet suhteessa laitteen kuljettamaan nimellistehoon, on erittäin tärkeää löytää keinoja, joiden avulla välttää kastepisteen muodostuminen ja siitä mahdollisesti aiheutuvat oikosulut. Kosteushaittoja ja kastepisteen muodostumista pyritäänkin välttämään sisäilman kierrätyksellä tai varmistamalla riittävä sisälämpötila esimerkiksi termostaattiohjattujen lämmityselementtien avulla. Hyvin ilmastoidut sähkötilat mahdollistavat matalan ja tasaisen ilmankosteuden laitetilojen ilmaan. Näin ne osaltaan estävät korroosion muodostumista komponenttien pinnoille taajuusmuuttajan sisällä, mikä parantaa laitteen käyttövarmuutta.

Taajuusmuuttajan käyttöpaikan suhteellista kosteutta on tärkeää mitata. Mittauksen voi tehdä teollisuudessa erilaisilla antureilla varsin tarkasti, ja mittaukselle voi asettaa hälytysrajat automaatiojärjestelmään. Ilmaan sitoutuneen kosteuden määrä voi vaihdella paljonkin eri vuodenaikojen välillä, ja kosteuden tasoa voidaan mitata myös aistinvaraisesti ääritilanteiden välillä.

Esimerkiksi ABB:n valmistamien taajuusmuuttajien käyttöpaikan suhteellisen kosteusprosentin tulisi olla alle 95 eikä kondensoitumista saisi tapahtua. Kondensoituminen tapahtuu yleensä 95 – 100 suhteellisessa kosteusprosentissa. [17]

### 3.3.3. Epäpuhtaudet

Ilmassa oleva ja taajuusmuuttajan sisään pääsevä pöly, lika ja mahdolliset korroosiota aiheuttavat kemikaalit voivat myös aiheuttaa vikoja taajuusmuuttajassa. Tehdasympäristössä ilmanlaatu voi olla prosessissa käytettyjen kemikaalien ja prosessilämpötilojen vuoksi erittäin huono ja sillä voi olla selviä korroosiovaikutuksia taajuusmuuttajan sähköisiin komponentteihin. Yleensä sähkötilojen ilmanlaatu on suhteellisen hyvä verrattuna tehdassalin ilmaan, mutta jos tilojen ovia pidetään pitkään auki eikä sähkötiloja puhdisteta säännöllisesti, voi lian ja pölyn määrä päästä lisääntymään riskialttiille tasolle sähkötiloissa. Lian ja pölyn pääsy ja kertyminen sähkötilan ilmasta taajuusmuuttajan sisälle komponenttien ja johtimien pinnoille lisää oikosulkujen ja epätoiminnallisuuden riskiä.

Taajuusmuuttajien laitetuulettimiin on saatavilla myös ilmansuodattimia, mutta ne huonontavat jäähdytyksen hyötysuhdetta sekä vaativat säännöllisestä vaihtoa tai puhdistusta toimiakseen oikein. On olemassa myös aktiivisia kaasusuotimia, jotka estävät haitallisten kemikaalien pääsyn taajuusmuuttajan sisäilmaan.

### 3.3.4. Korroosio

Korroosio on enemmän tai vähemmän ongelmana kaikissa elektronisissa laitteissa ja edellä mainitut ympäristöolosuhteet, lämpötila ja ilmankosteus, lisäävät sitä entisestään. Laite altistuu koko elinkaarensa ajan korroosiolle, joka heikentää elektronisten komponenttien ja piirien toimintavarmuutta.

Korroosiosta aiheutuneet laitehäiriöt ovat yleensä pitkän ajan saatossa aiheutuneita satunnaisia vikoja, joita on hankala todentaa ilman tarkkoja mittauksia. Prosessiteollisuudessa on edelleen käytössä paljon vanhoja elektronisia komponentteja ja piirikortteja, jotka ovat altistuneet lämmölle, kosteudelle ja ilman kemikaaleille vuosikymmeniä. On vaikeaa ennustaa, kuinka kauan ne vielä toimivat. Korroosiota voi kuitenkin paikantaa myös silmämääräisesti, sillä esimerkiksi kupari tummuu kun korroosio vaikuttaa siihen. Tummuminen on merkki kuparin pinnalle muodostuneesta oksidi- tai sulfidikerroksesta. Ilmanlaatua ja korroosion voimakkuutta mitattaessa voidaan tehdä niin sanottuja liuskatestejä, joissa käytetään paljaita kuparilevyjä havaitsemassa ilman epäpuhtauksia. Kuparin altistumista korroosiolle voidaan suojata esimerkiksi tina- tai nikkelipinnoitteella. [18]

Taajuusmuuttajissa korroosiota vastaan taistellaan muun muassa piirikorttien lakkauksella. Valmiit piirikortit päällystetään ohuella lakkakerroksella, jolloin ilmassa olevat kemikaalit ja kortin pinnalle tiivistynyt kosteus ei pääse aiheuttamaan oikosulkuja tai korroosiota piirikorttien komponentteihin tai johdinvetoihin. Lakattuja piirikortteja on saatavilla useisiin taajuusmuuttajiin lisäoptiona. Prosessiteollisuudessa usein suosi-

tellaan lakattuja piirikortteja kaikkiin taajuusmuuttajiin, sillä niiden on todettu parantavan korttien toimintavarmuutta.

Korroosiota lisäävät ja nopeuttavat seuraavat tekijät:

- Korkea lämpötila
- Lämpötilan vaihtelu ja sen nopeus
- Kosteus (tiivistyminen, valuminen, roiskuminen)
- Sähkö (osan läpi kulkeva virta ja sen yli oleva jännite)
- Ilman virtausnopeus ja ilmassa olevat epäpuhtaudet (pöly, suolat ja kaasut)
- Auringon säteily

Materiaalivalinnoilla, sopivilla suojaustekniikoilla ja rakenteellisilla ratkaisuilla pyritään minimoimaan korroosion vaikutukset taajuusmuuttajien tapauksessa. Korroosion hidastamiseen ja estoon on olemassa erilaisia keinoja:

- Kotelon ja elektroniikan pitäminen kuivana
- Minimoidaan kaasujen pääsy elektroniikan kanssa kontaktiin
- Lämpötilan vaihteluiden ja värinän välttäminen
- Vikasietoisen elektroniikan käyttäminen
- Metallipintojen suojaus veden ja ilman suoralta kosketukselta
- Kemiallisesti yhteensopivien materiaalien käyttö kontaktipinnoissa [18]

### 3.4. Asennus ja käyttöönotto

Laitevalmistajat antavat usein taajuusmuuttajalle asennusohjeita käyttöohjeissaan. Näitä ohjeita tulee noudattaa tarkasti, jotta laite toimisi sille luvatus ajan oikein. Esimerkiksi laitteeseen tulevan jäähdytysilman lämpötila ei saa olla yli 40 °C, mikä tarkoittaa, että sähkötilaan asennettuna ei sähkötilan lämpötila saa olla yli 40 °C.

Käyttöönotettaessa taajuusmuuttajaa tulee huolehtia seuraavista asioista:

1. Moottorin valinta taajuusmuuttajan ohjekirjan nimellisarvotaulukoiden mukaan. Jos oletuskuormitusjaksoja ei voida soveltaa, tulee käyttää esimerkiksi laitevalmistajien suosittelemia PC-työkaluja apuna mitoituksessa.
2. Moottorin yhteensopivuus: moottorin nimellisarvot tulee olla taajuusmuuttajan sallimissa rajoissa. Sopivat moottorin nimellisjännitteet ja -virrat löytyvät taajuusmuuttajan ohjekirjasta.
3. Moottorin jännitearvojen tulee täyttää sovelluksen vaatimukset: jos taajuusmuuttaja on varustettu diodeilla toteutetulla tasasuuntaussillalla ja on moottoritilassa (eli ei jarrutustilassa), moottorin jännite valitaan taajuusmuuttajaa syöttävän vaihtovirtajännitteen mukaan. Jos taajuusmuuttaja on varustettu IGBT-verkkosuuntaajalla tai jos välipiiriin



on kytketty jarruvastus, tulee moottorin nimellisjännite valita taajuusmuuttajan syöttämän vaihtojännitteen mukaan.

Taajuusmuuttajan syöttämä vaihtojännite lasketaan tässä tapauksessa seuraavasti kaavan (11) avulla. [17]

$$U_{out} = U_{DC\_max} / 1,35 \quad (11)$$

jossa  $U_{out}$  = taajuusmuuttajan syöttämän vaihtojännitteen pääjännite

$U_{DC\_max}$  = taajuusmuuttajan välipiirin enimmäistasajännite

4. Jos moottorin nimellisjännite eroaa taajuusmuuttajan syöttöjännitteestä, taajuusmuuttajan käyttöönottajen tulisi kysyä lisätietoja moottorin valmistajalta ennen moottorin käyttöä kyseisessä järjestelmässä.

5. Moottorin riittävistä eristyksistä tulee varmistua. [16; 17]

Yleensä taajuusmuuttajien ohjekirjoissa on lista läpikäytävistä asioista, jotka tulisi käydä läpi myös yhdessä toisen henkilön kanssa. Alaluvuissa 3.3.1 ja 3.3.2 on esitelty yleensä esiintyvät kohdat.

#### 3.4.1. Mekaaninen asennus

Taajuusmuuttajan mekaaninen asennus tulee suorittaa huolella ja varmistua, että seuraavat kohdat täyttyvät ennen laitteen käyttöönottoa.

- Käyttöympäristön olosuhteet tulee olla hyväksyttävät.
- Taajuusmuuttaja tulee asentaa fyysisesti oikein.
- Jäähdytysilman tulee pystyä virtaamaan vapaasti.
- Käytettävä laite ja moottori ovat toimintavalmiudessa.
- Taajuusmuuttajan sisälle ei ole jäänyt mitään ylimääräistä, kuten työkaluja tai porauspölyä.
- Taajuusmuuttajan ja moottorin kytkentäkotelon kannet ovat paikoillaan. [16; 17]

#### 3.4.2. Sähköinen asennus

Taajuusmuuttajan sähköiset liitännät tulee tarkistaa huolellisesti ennen laitteen käyttöönottoa ja varmistua, että seuraavat kohdat täyttyvät.

- Jos taajuusmuuttaja on liitetty maadoittamattomaan IT-verkkoon, tulee taajuusmuuttajan lähdössä olevan EMC-suotimen kondensaattorit kytkeä irti.
- Jos taajuusmuuttaja on ollut yli vuoden käyttämättömänä, tulee sen kondensattoreille tehdä vaadittavat toimenpiteet (elvytys).
- Tulee varmistua, että taajuusmuuttaja on maadoitettu oikein.
- Syöttävän verkon jännitteen tulee vastata taajuusmuuttajan nimellistä tulojännitettä.

- Syöttö- ja lähtökaapeleiden liitännät ovat oikein kytketty ja oikeassa kiristysmomentissa. Lisäksi verkkosulakkeiden oikea koko tulee tarkistaa ja erotin tulee olla asennettuna.
- Moottorikaapeli tulee olla erillään muista kaapeleista eikä siihen ole kytkettynä kompensointikondensaattoreita.
- Taajuusmuuttajan ulkoiset ohjausliitännät ovat kytketty oikein.
- Tulee varmistua, ettei ohituskäytössä taajuusmuuttajan lähtöliittimiin voi kytkeytyä verkkojännitettä. [16; 17]

### 3.5. Huollot ja huoltovälit

Taajuusmuuttajan ollessa asennettu oikein ja oikeanlaiseen ympäristöön, se tarvitsee suhteellisen vähän huoltotoimenpiteitä. Taulukossa 3.1 on esitelty erään laitevalmistajan antamia yleisiä huoltovälisuosituksia.

**Taulukko 3.1.** *Erään laitevalmistajan suosittamat taajuusmuuttajan osien huoltovälit.*

Huoltotoimenpide	Huoltoväli
Kondensaattorien ylläpito	Joka vuosi, jos säilytetään varastossa
Jäähdytyslementtien puhdistus ja lämpötilan tarkastus	6 - 12kk (ympäristön pölyisyydestä riippuen)
Jäähdytyspuhaltimen vaihto	6 vuoden välein
Lisäjäähdytyspuhaltimen vaihto IP21- ja IP55-taajuusmuuttajissa	3 vuoden välein
R4 ja suuremmat runkokoot: kondensaattoreiden vaihto	10 vuoden välein

Taajuusmuuttajien yleisimmät huoltotoimenpiteet liittyvät jäähdytykseen ja iän myötä vaihdettaviin elektrolyyttikondensaattoreihin.

#### Kondensaattorit

Taajuusmuuttajan välipiirissä on useita elektrolyyttikondensaattoreita, eikä niiden vikaantumista voida kunnolla ennustaa. Kondensaattoreiden käyttöikä riippuu taajuusmuuttajan kuormituksesta sekä ympäristön lämpötilasta, mutta taajuusmuuttajissa käytettävien kondensaattoreiden yleinen käyttöikä on noin 45 000 - 90 000 tuntia. Elinikää voidaan pidentää laskemalla sen käyttöympäristön lämpötilaa tai ylimitoittamalla elektrolyyttikondensaattorin jännitteenkestoa. Kondensaattorit vikaantuvat aiheutuvat usein vikalaukaisun tai verkkosulakkeiden palamisen yhteydessä. Vioittuneen kondensaattorin vaihto täytyy tehdä laitevalmistajalta saatavien ohjeiden mukaisesti.

### **Jäähdytysselementit**

Jäähdytysselementit keräävät ilman epäpuhtauksia kuten pölyä. Kun epäpuhtauksia kertyy liikaa, taajuusmuuttaja antaa vikailmoituksen ja ylläpövaroituksen. Normaalissa käyttöympäristössä jäähdytysselementin puhtaus tulee tarkistaa vuosittain, mutta epäpuhtaassa ympäristössä useammin. Ohjeet jäähdytysselementin puhdistukseen löytyy usein laitteen ohjekirjasta.

### **Jäähdytyspuhaltimet**

Jäähdytyspuhaltimien käyttöikään vaikuttavat ympäristön lämpötila sekä taajuusmuuttajan käyttömäärä ja kuormitus. Niiden tavallinen käyttöikä on noin 50 000 käyttötuntia. Puhaltimien vikaantumista voi koettaa ennustaa eri aistein: aiempaa meluisammat laakerit kertovat niiden huonosta kunnosta. Lisäksi jäähdytysselementti saattaa kuumeta yllättävän nopeasti ja paljon, vaikka sen puhtaudesta on huolehdittu. Puhallin tulisi vaihtaa heti kun ennusmerkkejä alkaa esiintyä, varsinkin, jos taajuusmuuttaja on kriittisessä sovelluksessa. Puhallin tulisi aina vaihtaa vain laitevalmistajan suosittelemiin varaosiin. Ohjeet jäähdytyspuhaltimen oikeaoppisesta vaihdosta löytyy taajuusmuuttajan ohjekirjasta.

**Lisäjäähdytyspuhallin** on yleensä suuremman suojausluokan yksiköissä (IP54 tai IP55) mutta nykyään myös useimmissa IP 21 -yksiköissä. Ohjeet lisäjäähdytyspuhaltimien vaihtoon eri taajuusmuuttajan runkomalleille löytyy myös laitevalmistajan ohjekirjasta. [15; 16; 17]

## **3.6. Taajuusmuuttajan elinkaarikustannukset**

Kappaleessa tarkastellaan taajuusmuuttajakäytöistä aiheutuvia kustannuksia, joita myöhemmin tässä työssä verrataan taajuusmuuttajille tehtävien huoltojen kustannuksiin.

Taajuusmuuttajan elinkaarikustannuksia laskettaessa täytyy ottaa huomioon monta eri kuluja aiheuttavaa tekijää:

- Hankintahinta
- Asennuskustannukset (materiaalit, kaapelointi)
- Asennuskustannukset (työtunnit)
- Käyttöönotto ja siihen liittyvät tarkastukset
- Tehohäviöistä (noin 2 % taajuusmuuttajan nimellistehosta) aiheutuneet kulut
- Huollot
- Taajuusmuuttajan loppusijoituskustannukset

Taulukossa 3.2 (s. 36) on esitelty arvio erään taajuusmuuttajan hankinta-, asennus- ja käyttöönottokustannuksista. Laskelmiin on otettu mukaan moottoripiirin asennus, joka sisältää 120 metriä kaapelia taajuusmuuttajalta moottorille ja tarvittavat kytkennät. Taulukko perustuu UPM:n materiaaleihin ja siinä käsitellään hinnat suhteellisina.

**Taulukko 3.2.** *Taajuusmuuttajakäytön (90 – 132 kW) aloituskustannukset.*

Toimenpide	Suhteellinen hinta	Huom!
Laite	52,7 %	Hinta keskimäärin 90 - 132 kW kaappimallille
Asennus	12,0 %	Sis. 120m kaapelia (keskus-taajuusmuuttaja)
Moottoriin sähköistys	26,9 %	Sis. 120m kaapelia ja turvakytken kytken
Turvakytkin	5,1 %	Sopivuus 90 - 132 kW teholuokalle
Laitteen siirto sähkötilaan	1,3 %	Arvio sis. työkalujen vuokran, + 2h työtä
Käyttöönotto	2,0 %	Arvio sis. konsultin + 4h työtä asentajilta
Kokonaiskustannusarvio	100,0 %	Arvio ei sisällä moottorin laitehintaa.

Laskelmat eivät sisällä moottorin hintaa, joka noin 100 kW oikosulkumoottorille olisi arviolta 39,0 % taulukon 3.2 kokonaiskustannusarviosta.

Taajuusmuuttajassa kuluu energiaa hukkaan lämpöhäviöinä noin 2 % laitteen verkosta ottamasta tehosta. UPM käyttää energiansäästölaskelmissaan taajuusmuuttajan käytölle seuraavia arvoja:

- Taajuusmuuttajan kuormitusaste keskimäärin 50 % nimellisestä tehosta
- Taajuusmuuttajan käyttötunnit vuodessa keskimäärin 8000 h (vuotuinen käyttöaste on silloin noin 91 %)

Taajuusmuuttajan energiankulutuksesta aiheutuneet kustannukset vuodessa ovat siis 90 – 132 kW –teholuokassa keskimäärin (laskussa käytetty teholuokan keskimääräistä arvoa 111 kW = 0,111 MW):

$$\text{Vuosittaiset kustannukset} = \frac{0,111 \text{ MW} \cdot 0,50 \cdot 8000 \text{ h} \cdot \text{sähkön hinta}}{\text{aloituskustannukset}} \cdot 100 \% = \underline{158,9 \%}$$

$$\text{Kahden prosentin lämpöhäviö} = 158,9 \% \cdot 0,02 = \underline{3,2 \%}$$

Sähkön hintana on käytetty UPM:n maksamaa keskimääräistä sähkön hintaa vuonna 2012. Vuosittaiset kustannukset ja kahden prosentin lämpöhäviökustannukset ovat suhteutettu taulukon 3.2 kokonaiskustannusarvioon.

On otettava huomioon, että kahden prosentin häviötehot eivät läheskään aina pidä paikkaansa, sillä taajuusmuuttajan häviöihin vaikuttaa kytkentätaajuus: mitä suurempi kytkentätaajuus, sitä suuremmat häviöt. Häviötehot voivat olla suurella kytkentätaajuudella jopa seitsemän prosenttia taajuusmuuttajan nimellistehosta. [16]

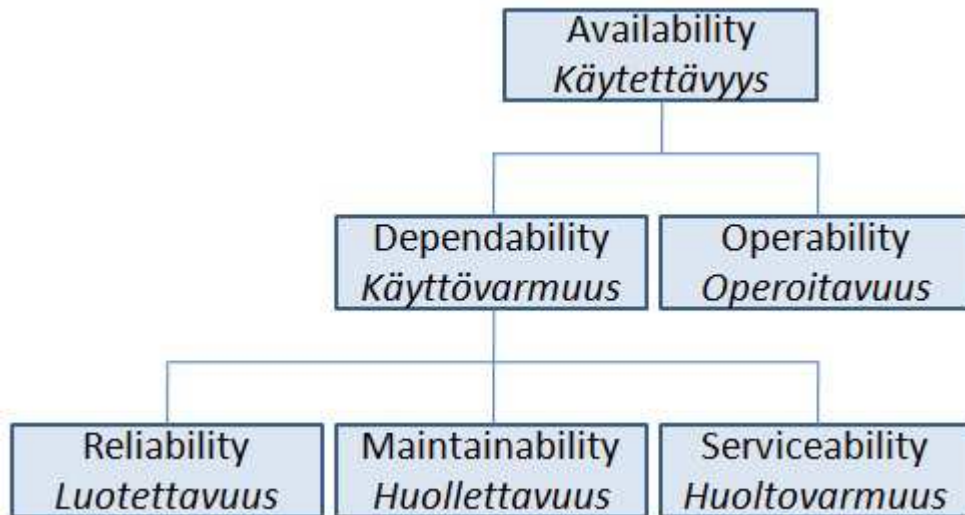
## 4. KÄYTTÖVARMUUDEN, LUOTETTAVUUDEN JA RISKIENHALLINNAN TEORIAA

Käyttövarmuuden ja luotettavuuden suunnittelu sekä kunnossapito ovat riskien hallintaa, jossa pyritään hallitsemaan satunnaisia vikoja eli hasardeja. Sähköisten osien ja laitteiden luotettavuus on saavuttanut kasvavaa huomiota viimeisten vuosikymmenten aikana. Sähköisistä komponenteista koostuvat kokonaisuudet ovat muuttuneet monimutkaisimmiksi, mutta samalla niitä käytetään erittäin kriittisissä kohteissa. Huolimatta kasvaneesta tarpeesta, niiden luotettavuuden suunnitteluun ei ole uhrattu vielä riittävästi huomiota. Syynä lienee aihealueen monimutkaisuus, ja vaatimukset useiden aihealueiden ymmärtämiseen. Tarvitaan muun muassa todennäköisyyslaskennan ja tilastotieteen tuntemusta, elektronisten piirien ja laitteiden suunnittelutaitoa sekä sähköisten komponenttien ominaisuuksien tuntemusta. Lisäksi luotettavuuteen liittyy aina myös ympäristön olosuhteet, joten tarvitaan myös fysiikan ja kemian tuntemusta muun muassa korroosioilmiön ymmärtämiseen.

Teollisuudessa laitteet ja järjestelmät voidaan jakaa korjattaviin ja ei-korjattaviin kokonaisuuksiin. Taajuusmuuttajia voidaan pitää teho- ja hintaluokasta riippuen usein sekä korjattavina että ei-korjattavina. Usein pienten ja hinnaltaan halpojen taajuusmuuttajien vian etsiminen ja korjaaminen katsotaan niin aikaa vieväksi ja kalliiksi, että niitä ei kannata korjata. Isompien ja kalliimpien taajuusmuuttajien tapauksessa vikaantumisen syy pyritään ainakin selvittämään sekä muodostamaan korjaushinnan arviointi. Usein isot taajuusmuuttajat myös päädytään korjaamaan. Korjattava laite tai järjestelmä koostuu usein osista tai laitteista, jotka ovat ei-korjattavia. [20]

### 4.1. Keskeiset käsitteet ja kaavat

Käyttövarmuudesta ja luotettavuudesta puhuttaessa sekoitetaan usein keskenään termit luotettavuus, käyttövarmuus ja käytettävyyys. Käsite käytettävyyys (availability) koostuu laitteen tai järjestelmän käyttövarmuudesta (dependability) ja siihen liittyvistä luotettavuudesta (reliability), huollettavuudesta (maintainability) ja huoltovarmuudesta (serviceability) (kuva 4.1, s. 37). Käytettävyyteen liittyy myös termi operoitavuus (operability), joka kuvaa kuinka hyvin laitetta tai järjestelmää pystytään käyttämään, ja kuinka se osaltaan vaikuttaa myös käytettävyyteen.



**Kuva 4.1.** Käyttövarmuuden ja luotettavuuden keskeisten käsitteiden kytkeytyminen toisiinsa.

Seuraavissa alaluvuissa on käsitelty edellä luotettavuuden ja käyttövarmuuden käsitteitä ja kaavoja.

#### 4.1.1. Luotettavuus

Käsitteellä luotettavuus tarkoitetaan laitteen kykyä toimia vikaantumatta tietyllä todennäköisyydellä tietyissä olosuhteissa ja tietyllä aikavälillä. Laitteen kyky voidaan määrittää joko deterministisesti tai todennäköisyyksien avulla. Deterministinen lähestymistapa tarkoittaa, että pyritään ymmärtämään, miksi ja kuinka laite vikaantuu, ja miten laite voitaisiin suunnitella ja testata niin, että viat saataisiin eliminoidua. Nämä toimenpiteet edellyttävät laitteen vikaraporttien seikkaperäisiä analyysejä, vikaantumisiin liittyvien fysikaalisten ilmiöiden ymmärtämistä, laitteelle tehtävien kokeiden ja tarkastusten suunnittelua ja suorittamista sekä mahdollisesti laitteen uudelleen konfigurointia ja suunnittelua. Kaikki tämä on tärkeä ja oleellinen osa luotettavuusanalyysiä.

Luotettavuus  $R(t)$  on todennäköisyys, jolla osayksilö ei vikaannu ajanhetkeen  $t$  mennessä. Luotettavuus on hetkeen  $t$  selvinneiden lukumäärä ( $= L(t)$ ) jaettuna koko populaatiolla ( $N$ ) kaavan (12) mukaisesti. [22]

$$R(t) = \frac{L(t)}{N} \quad (12)$$

Laitteen todennäköisyyteen perustuva luotettavuus voidaan esittää lausekkeella (13).

$$R(T) = P(t_f \geq T) \quad (13)$$

jossa  $R(T)$  = laitteen luotettavuus aikavälillä  $T$   
 $P$  = todennäköisyys

$t_f$  = aika korjauksesta ensimmäiseen vikaan eli vikaantumisaika  
 $T$  = ajanjakso, jolle luotettavuus halutaan määrittää [20]

Luotettavuuden  $R(t)$  avulla voidaan lausua myös vikatiheysfunktio  $f(t)$ .

$$\int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt \quad (14)$$

Vikatiheysfunktio  $f(t)$  on epäluotettavuuden  $F(t)$  derivaatta.

$$f(t) = F'(t) \quad (15)$$

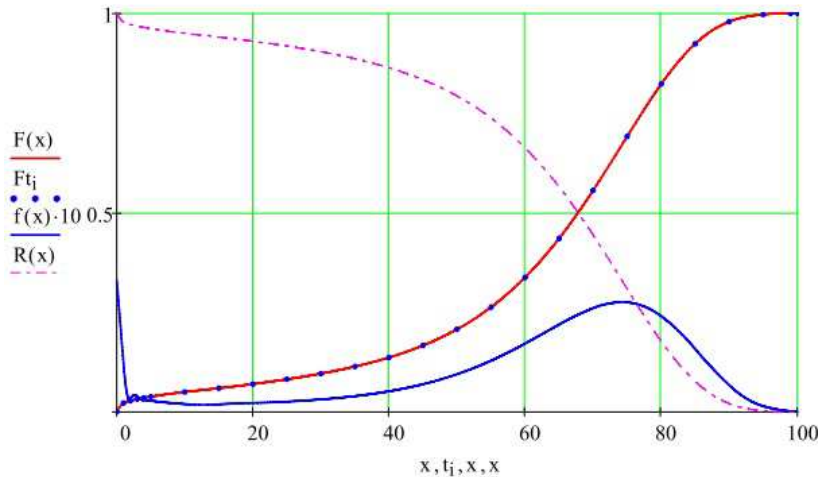
Epäluotettavuus  $F(t)$  voidaan määrittellä myös vikataajuuden  $r(t)$  avulla

$$F(t) = 1 - e^{-\int_0^t r(t) dt} \quad (16)$$

Vikataajuus  $r(t)$  voidaan määrittellä myös vikatiheysfunktion  $f(t)$  ja luotettavuuden  $R(t)$  suhteena.

$$r(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (17)$$

Käsitteiden luotettavuus, epäluotettavuus, vikatiheys sekä vikataajuus liittyminen toisiinsa on esitetty kuvassa 4.2.



**Kuva 4.2.** Käsitteet luotettavuus  $R(x)$ , epäluotettavuus  $F(x)$ , vikatiheys  $f(x)$ .

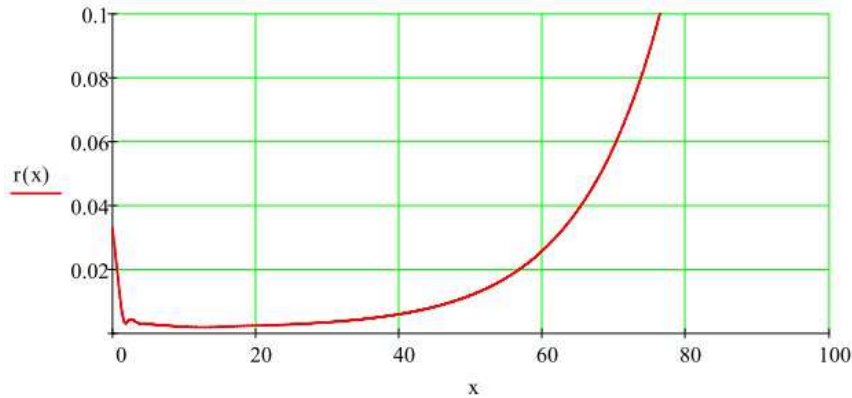
Kuvassa 4.2 näkyvä termi  $Ft_i$  kuvaa hetkeen  $t_i$  mennessä vikaantuneiden yksilöiden osuutta kaikista yksilöistä  $N$ . Epäluotettavuus  $F(x)$  on saatu yhdistämällä  $Ft_i$  :n pisteet toisiinsa ja siirtämällä kuva xy-koordinaatistoon. Vikatiheys  $f(x)$  on saatu kaavan (15) avulla derivoimalla epäluotettavuus  $F(x)$ . Vastaava luotettavuusfunktio määritellään kaavan (18) mukaan

$$R(x) = 1 - F(x) \quad (18)$$

Kaavojen (16) ja (18) avulla voidaan vikataajuusfunktio  $r(t)$  johtaa muotoon

$$r(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (19)$$

Kuvan 4.2 tietojen avulla voidaan vikataajuusfunktiolle  $r(x)$  piirtää kuvaaja (kuva 4.3).



**Kuva 4.3.** Vikataajuusfunktion  $r(x)$  kuvaaja

Vikataajuusfunktio  $r(x)$  liittyy ei-korjattaviin järjestelmiin ja laitteisiin ja se kuvaa todennäköisyyttä ensimmäiseen vikaan laitteen käyttömäärän  $x$  funktiona.

#### 4.1.2. MTTF

*MTTF* (Mean Time to Failure) tarkoittaa keskimääräistä aikaa osan tai laitteen käyttöönotosta ensimmäiseen vikaan eli se on *TTF*:n (Time to Failure) keskiarvo kaavan (20) mukaisesti.

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (20)$$

*MTTF* termiä käytetään sellaisten osien ja laitteiden tapauksessa, jossa vikaantuneen tilalle vaihdetaan uusi eikä vanhaa korjata ja oteta enää käyttöön samalla toimintopaikalla. Esimerkiksi taajuusmuuttajassa on paljon sähköisiä osia kuten vastuksia, kondensaattoreita ja keloja, joita ei korjata vaan ne vaihdetaan vikaantuessaan uusiin vastaviin.

#### 4.1.3. Käyttövarmuus ja käytettävyys

Käyttövarmuus tarkoittaa laitteen kykyä olla tilassa, jossa se pystyy suorittamaan vaaditun toiminnon tietyn ajanjakson aikana ja tietyissä olosuhteissa, jos sen toiminnan vaatimat ulkoiset resurssit ovat käytössä. Vaikka standardi SFS-EN-60300-1 tuntee vain käsitteen käyttövarmuus, sen rinnalla käytetään usein käsitettä käytettävyys. Kohteen todennäköisyyteen perustuva käsite käytettävyys määritellään seuraavasti: käytettävyys



(Availability)  $A(t)$  aikavälillä  $t_1..t_2$  on todennäköisyys, että laite on ehjä ajanhetkellä  $t_2$  edellyttäen, että ajanhetkellä  $t_1$  se oli uusi tai uudenveroinen. [20]

Käytettävyys voidaan laskea yhtälöstä (21):

$$A(t_1..t_2) = [1 + (\frac{\Lambda(t_2) - \Lambda(t_1)}{t_2 - t_1}) \cdot (MTTR + P_{\text{korjaus}} \cdot MLDT)]^{-1} \quad (21)$$

jossa  $\Lambda(t)$  = vikataipumus  
 $MTTR$  = keskimääräinen korjausaika  
 $P_{\text{korjaus}}$  = korjaukseen liittyvän viiveen todennäköisyys  
 $MLDT$  = korjauksen aloittamiseen liittyvä keskimääräinen viive

Laitteen keskimääräinen käytettävyys aikavälillä  $t_1..t_2$  voidaan esittää lausekkeella (22):

$$A(t_1..t_2) = \frac{N}{(N + V)} = (1 + \frac{V}{N})^{-1} \quad (22)$$

jossa  $N$  = normaalitilojen kesto yhteensä aikavälillä  $t_1..t_2$ .  
 $V$  = vikatilojen kesto yhteensä aikavälillä  $t_1..t_2$ .

Normaalitilassa laite on toimintakykyinen ja tilan pituuteen vaikuttaa järjestelmän ja laitteen osien luotettavuus. Kun laite ei pysty suorittamaan vaadittua tehtäväänsä, on se vikatilassa, jonka pituuteen vaikuttaa korjaukseen liittyvät tekijät kuten huollettavuus ja huoltovarmuus. [20]

#### 4.1.4. Huollettavuus ja huoltovarmuus

Kuvassa 4.1 esitetyt termit huollettavuus ja huoltovarmuus liittyvät järjestelmän kunnossapitoon seuraavalla tavalla:

**Huollettavuus:** todennäköisyys, että laite on palautettavissa toimintokuntoon kun on käytettävissä vaaditut resurssit ja työkalut

**Huoltovarmuus:** huolto-organisaation kyky ylläpitää kohteen suunniteltu sisäänrakennettu luotettavuus

#### 4.1.5. Epäkäytettävyys ja epäluotettavuus

Epäkäytettävyydellä  $Q(t)$  (Unavailability) tarkoitetaan todennäköisyyttä sille, että laite on vialla hetkellä  $t$ , edellyttäen että se on ollut ehjä tai uudenveroinen hetkellä  $t = 0$ . Koska korjattava laite voi olla kahdessa eri tilassa, ehjänä tai vialla, niin kaavan (23) mukaan:

$$A(t) + Q(t) = 1 \quad (23)$$

Epäkäytettävyys  $Q(t)$  on usein pienempi kuin epäluotettavuus  $F(t)$ :

$$A(t) \geq R(t) = 1 - F(t) \rightarrow 1 - A(t) < F(t) \quad (24)$$

$$Q(t) \leq F(t) \quad (25)$$

Kaavassa (25) yhtäläisyysmerkki on voimassa ei-korjattavalla osalla.

#### 4.1.6. MTBF

*MTBF* (Mean Time Between Failures) eroaa *MTTF*:stä siten, että *MTBF* ottaa huomioon osien korjauksen. *MTBF* on keskimääräinen aika laitteen vikaantumiseen sen edellisestä alkuperäiseen kuntoon saattamisesta eli korjauksesta. *MTBF* kertoo siis keskimääräisen ajan vikojen välillä, kun kokonaisaika jaetaan vikojen lukumäärällä. Yksittäisten taajuusmuuttajien tapauksessa *MTBF*-arvoa ei juurikaan voida käyttää, sillä taajuusmuuttajan lähdettyä huoltoon sen tilalle tulee yleensä mahdollisimman nopeasti kokonaan uusi taajuusmuuttaja ja jos vanha saadaan korjattua, se laitetaan todennäköisesti jollekin toiselle toimintopaikalle ja toiseen sovellukseen. Taajuusmuuttajan korjausaika ei siis yleensä aiheuta epäkäytettyä prosessiteollisuudessa.

*MTBF* voidaan laskea kaavalla (26) jos tiedetään tarkasteluajanjakso ( $t$ ) ja sen aikana esiintyneiden vikojen lukumäärä ( $N_f$ ). [22]

$$MTBF = \frac{t}{N_f} \quad (26)$$

*MTBF* voidaan myös määrittää *MTTF*:n ja *MTTR*:n (Mean Time to Repair) avulla:

$$MTBF = MTTF + MTTR \quad (27)$$

jossa  $MTTF$  = Mean Time To Failure  
 $MTTR$  = Mean Time to Repair

#### 4.1.7. ROCOF eli hasardifunktio

*ROCOF* (Rate of Occurrence of Failure) eli hasardifunktio  $h(t)$  kuvaa *korjattavan* järjestelmän vioittumisen taajuutta kyseisen järjestelmän elinkaaren eri aikoina. *ROCOF* on vioittumisen todennäköisyys pienellä aikavälillä jaettuna koko aikavälin pituudella (vika ei välttämättä ole ensimmäinen). Hasardifunktio  $h(t)$  saadaan vikataipumusfunktioista  $A(t)$  derivoimalla kaavan (28) mukaan. Vikataipumus  $A(t)$  tarkoittaa vikojen keskimääräistä lukumäärää hetkeen  $t$  mennessä.

$$A'(t) = h(t) \quad (28)$$

Hasardifunktio  $h(t)$  kertoo kuinka suuri laitteen vikataajuus on ollut eri elinkaaren aikoina. [20]

Hasardifunktion kuvaama periaatteellinen vikataajuus on esitetty kuvassa 4.4. Sitä kuvataan usein kylpyammemaisella kuvaajalla.



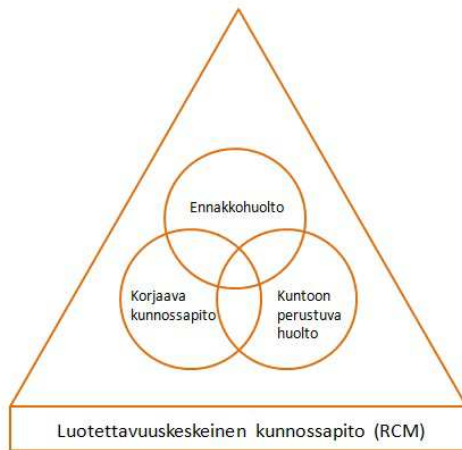
**Kuva 4.4.** Hasardifunktiota  $h(t)$  kuvataan usein kylpyammekäyrällä. [20]

Kuvassa 4.3 on esitelty hasardifunktion vikataajuuden kolme eri vaihetta: sisäänajo, hyödyllinen käyttö ja loppuun kuluminen.

## 4.2. Luotettavuuskeskeinen kunnossapito

Termillä luotettavuuskeskeinen kunnossapito, RCM (Reliability Centered Maintenance), tarkoitetaan menetelmää parhaiden kunnossapitotoimintojen määrittämiseksi, joilla saavutetaan minikustannuksilla suunniteltu luotettavuuden taso. Luotettavuuskeskeisessä kunnossapidossa pyritään määrittämään oikeat toiminnot ja niiden toteuttamisen ajankohdat, jotta laitteen vikaantumisen todennäköisyyttä voitaisiin pienentää kustannustehokkaasti. RCM:ssä käytetään hyväksi eri kunnossapitostrategioita ja pyritään määrittämään oikeat suhteet niiden välille. Kolme pääasiallista kunnossapitostrategiaa ovat (kuva 4.5, s. 43):

- 1) Korjaava kunnossapito (laitetta käytetään vikaantumiseen asti jonka jälkeen se korjataan)
- 2) Ennakkohuolto (tuotantoprosessiin sopeutuva ja laitteen käyttömäärään perustuva huoltotapa)
- 3) Kuntoon perustuva huolto



**Kuva 4.5.** *Luotettavuuskeskeinen kunnossapito. [23]*

Luotettavuuskeskeinen kunnossapito on syntynyt sen seurauksena, kun teollisuudessa tehtävien huoltojen vaatimukset ovat kasvaneet. Vuosikymmeniä sitten laitteet korjattiin vasta niiden rikkoutuessa, mutta myöhemmin kunnossapitomenetelmissä on tapahtunut muutoksia. Ensimmäisenä teollisuudessa alettiin vaatia korkeampaa laitoksen ja prosessin käytettävyyttä, pidempää laitteen käynti-ikää sekä pienempiä kustannuksia. Näihin tavoitteisiin päästiin kehittämällä menetelmiä töiden parempaan suunnitteluun ja ohjaamiseen sekä vaihtamalla koneiden osia määräaikaaisesti.

Viime vuosina on alettu vaatia entistä korkeampaa laitoksen käytettävyyttä ja käyttövarmuutta sekä parempaa turvallisuutta. Lisäksi tuotantoprosessi pitäisi pystyä hoitamaan ilman ympäristövahinkoja ja mahdollisimman kustannustehokkaasti. Teollisuudessa laitteiden kunnonvalvonta on yleistynyt ja luotettavuutta ja kunnossapidettävyyttä on ryhdytty seuraamaan ja suunnittelemaan sekä tutkimaan aiheutuneita häiriöitä tarkemmin. Tietokoneiden nopea kehitys on mahdollistanut erilaiset vikamuoto- ja vaikutusanalyysit sekä asiantuntijajärjestelmät. Myös työntekijöiden monitaitoisuus ja tiimityön korostaminen ovat tuoneet oman tärkeän lisänsä luotettavuuden suunnitteluun.

Käsitys laitteiden vikaantumisesta on muuttunut lähivuosien aikana. Nykyään tiedetään, että laitteiden vikaantumisen ja käyttöiän välinen yhteys on pienempi kuin mitä ennen väitettiin. Nykyään uskotaan laitteiden voivan noudattaa useaa eri teoreettista vikaantumiskäyrää. Lisäksi tiedetään, että ehkäisevästä ja suunnitellusta kunnossapidosta suuri osa (jopa 40 %) on tarpeetonta. Ennakkohuolloissa laitteita puretaan kunnon selvittämiseksi, joka kasvattaa laitteen vikaantumisen todennäköisyyttä. Ennakkohuolloissa kunnossapitotoimenpiteitä ei osata kohdentaa ja suunnitella riittävän hyvin. [23]

RCM:ssä lähtökohtana pitäisi olla huoltotehtävien priorisointi: tulisi määrittää käyttökelpoiset kunnossapidon keinot kyseisessä toimintaympäristössä sekä niiden järkevä hallinta. Lisäksi huoltojen seurannaisvaikutukset tulisi pohtia etukäteen. Näin kunnossapito voitaisiin kohdentaa sellaisiin kohteisiin, jossa huoltaminen on tehokasta ja siitä saavutettaisiin selkeää hyötyä laitteen luotettavuudelle. Tämän seurauksena myös rutiininomaiset huoltotoimenpiteet vähenisivät merkittävästi. [20; 23]

Luotettavuuskeskeinen kunnossapito vaatii toimiakseen jatkuvaa tiedonkeräystä tuotantoprosessin suorituskyvystä. Saadun tiedon avulla on mahdollista tehdä parempia suunnitteluratkaisuja ja saada kunnossapito toimimaan paremmin tulevaisuudessa. Analyysissä tulisi pohtia, että mikä on tarkasteltavan laitteen funktio ja mitä se tekee. Myös laitteessa mahdollisesti esiintyviä toiminnallisia vikoja sekä niiden syitä ja seurauksia tulisi pohtia syvällisesti, sekä selvittää, miten vikojen esiintymisen todennäköisyyttä ja vikojen seurauksien laajuutta voitaisiin pienentää. Luotettavuuskeskeinen kunnossapito perustuu kuvassa 4.6 esiteltujen vaiheiden huolelliseen selvittämiseen. [23]



**Kuva 4.6.** Luotettavuuskeskeisen kunnossapidon vaiheet.[23]

Luotettavuuskeskeisen suunnittelun analyysi koostuu kuvan 4.7 askelista. [23]



**Kuva 4.7.** Luotettavuuskeskeisen suunnittelun analyysin vaiheet. [23]

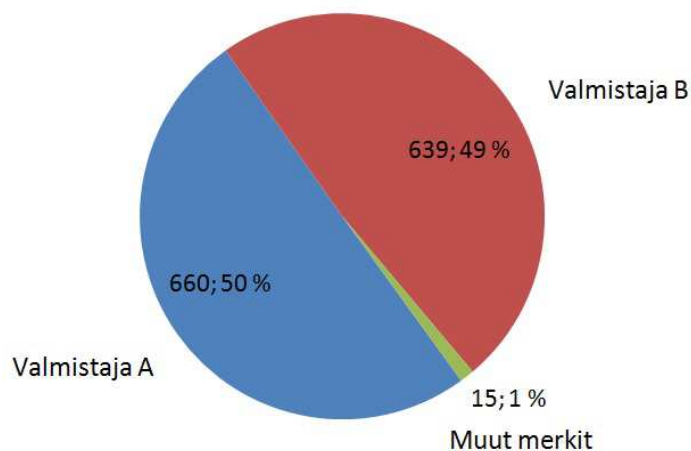
Luotettavuuskeskeisen suunnittelun analyysissä osa kohdista on enemmän laitevalmistajalle suunnattuja ja osa enemmän laitteen käyttäjälle suunnattuja toimenpiteitä. Usein olisi tehokasta, jos laitteen tai järjestelmän käyttäjä sekä kehittäjä/valmistaja pohtisivat yhdessä miten laitteesta saisi kyseisessä toimintopaikassa entistä luotettavamman.

## 5. TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTO

Diplomityön empiirinen osuus keskittyi pääasiassa taajuusmuuttajien todellisten vika- ja historiatietojen keräämiseen. Työtä varten kerättiin taajuusmuuttajien historiatietoa UPM Kaipolan ja UPM Jämsänkosken paperitehtailta, jotka toimivat empiirisenä tutkimusympäristönä työlle. Paperitehtaat ovat tutkimuksen luonteen kannalta ihanteellinen ympäristö, sillä molemmilla tehtailla on käytössä useita satoja taajuusmuuttajia.

### 5.1. Tehtaiden taajuusmuuttajakannan selvitys

Käytännön osuuden alussa selvitettiin UPM Kaipolan ja Jämsänkosken tehtaiden yhteinen taajuusmuuttajakanta, eli kuinka monta taajuusmuuttajaa tehtailla yhteensä oli tarkasteluhetkellä. UPM:llä on käytössään SAP-tuotannonohjausjärjestelmä, jossa kaikille erilaisille taajuusmuuttajille on olemassa UPM:n oma nimikenumero. Tehtailla oli tutkimushetkellä yhteensä 525 kappaletta erilaisia ja aktiivisia taajuusmuuttajanimikkeitä. Nimikelistan avulla sai SAP:sta selvitettyä toimintopaikat, joille kyseinen taajuusmuuttajanimike on kiinnitetty. Suurin osa nimikkeistä oli kiinnitettynä usealle eri toimintopaikoille tehtailla, joten taajuusmuuttajien kokonaismäärä oli paljon suurempi kuin pelkkien nimikkeiden määrä. Taajuusmuuttajien kokonaismäärän selvittämiseksi ei keksitty muuta keinoa kuin tarkistaa jokaisen nimikkeen toimintopaikat erikseen. Tämä osoittautui varsin suuritöiseksi. Kokonaismääräksi muodostui lopulta 1314 kappaletta. Kun kokonaismäärä oli selvillä, oli mahdollista selvittää taajuusmuuttajien jakaantuminen eri laitevalmistajien kesken. Tulokset on esitetty kuvassa 5.1.



**Kuva 5.1.** Taajuusmuuttajien merkijakauma UPM Kaipolan ja Jämsänkosken tehtailla.

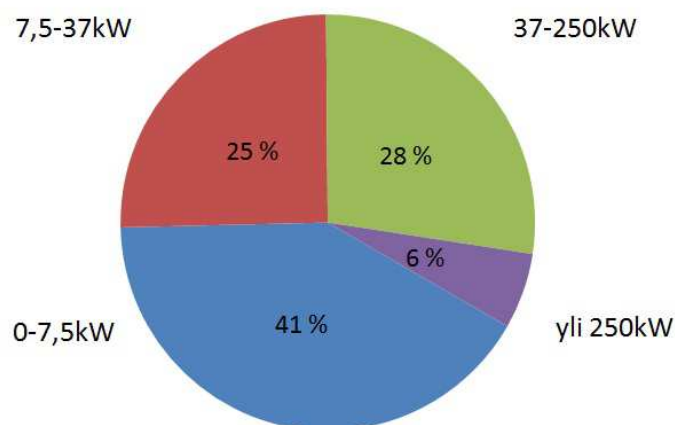
Taajuusmuuttajat jakaantuivat varsin tasaisesti Valmistaja A:n ja Valmistaja B:n kesken. Valmistaja A:n valmistamia taajuusmuuttajia oli yhteensä 661 kappaletta (50 % koko taajuusmuuttajakannasta) ja Valmistaja B:n valmistamia 637 kappaletta (49 % koko kannasta), mikä teki myöhemmän luotettavuustarkastelun varsin selkeäksi. Tehtailla oli myös 15 kappaletta (1 % koko taajuusmuuttajakannasta) muiden laitevalmistajien taajuusmuuttajia.

Koska tehtailla on taajuusmuuttajia useissa erilaisissa sovelluskohteissa, niiden teholuokkakajakauma oli myös tärkeää selvittää. Teholuokkakajakauman selvitys oli varsin työläs osuus, sillä jokaisen taajuusmuuttajan teho piti selvittää erikseen taajuusmuuttajan SAP-nimikkeen kuvauksen perusteella. Nimikkeen kuvaus kertoi laitevalmistajan tuotekoodin. Tuotekoodin ja valmistajan esitteiden sekä Internet-sivujen avulla sai selville kyseisen taajuusmuuttajan tehon. Osassa nimikkeistä oli saatettu myös tallentaa SAP-järjestelmän nimikkeen tietoihin taajuusmuuttajan teho- sekä muut asiaan liittyvät tiedot kuten nimellisvirrat ja – jännitteet. Suurimassa osassa näin ei kuitenkaan oltu tehty.

Tehtaiden taajuusmuuttajat päätettiin jaotella neljään eri teholuokkaan, joihin laitevalmistajatkin yleensä jaottelevat taajuusmuuttajat:

- 0 - 7,5 kW
- 7,5 – 37 kW
- 37 – 250 kW
- yli 250 kW

Taajuusmuuttajien teholuokkakajakauma UPM Kaipolan ja Jämsänkosken tehtailla on esitetty kuvassa 5.2.



**Kuva 5.2.** Taajuusmuuttajien teholuokkakajakauma UPM Kaipolan ja Jämsänkosken tehtailla.

Kohdeyrityksen tehtailla oli selkeästi eniten pieniä, 0 - 7,5kW taajuusmuuttajia (yhteensä 517 kappaletta, 41 % koko taajuusmuuttajakannasta). Seuraavaksi eniten oli 37 – 250 kW taajuusmuuttajia (yhteensä 358 kappaletta, 28 %). Teholuokan 7,5 – 37 kW taa-



juusmuuttajia oli yhteensä 318 kappaletta (25 %) sekä vähiten kaikkein suurimpia eli yli 250 kW teholuokkaan kuuluvia taajuusmuuttajia (77 kappaletta, 6 %).

#### 5.1.1. Tehtaiden taajuusmuuttajien sovelluskohteet ja käyttöpaikat

Taajuusmuuttajia on prosessiteollisuudessa useissa erilaisissa sovelluksissa. Kohdeyrityksen kahdella paperitehtaalla yleisimmät sovelluskohteet olivat pumppu- ja puhallinkäytöt. Tämän lisäksi taajuusmuuttajia oli muun muassa kuljetinkäytöissä, terä- ja asemien siirto -käytöissä paperikoneiden pituusleikkureilla sekä erilaisissa sekoitinlaitekäytöissä. Taajuusmuuttajat tulee mitoittaa erilailta erilaisiin sovelluskohteisiin riippuen siitä, kuinka raskaalla käytöllä ne ovat. Kohdeyrityksen tehtailla pumppu- ja puhallinkäytöt ovat pääasiassa mitoitettu raskaan käytön mukaan kaavan (8) avulla. Muut sovellukset on mitoitettu normaalin käytön mukaan kaavan (9) avulla.

#### **Tehtaiden taajuusmuuttajien sovellustyypit:**

1. pumppu- ja puhallinkäytöt
2. kuljetinkäytöt
3. terä- ja asemien siirtokäytöt paperikoneiden pituusleikkureilla
4. sellu- ja hierrejauhimien terävilinsäätökäytöt
5. polttoaineen kola- ja ruuvipurkainkäytöt
6. paperikoneen päänvientikuljetinkäytöt
7. nosturikäytöt
8. ruuvi- ja viirapuristinkäytöt
9. sekoitinlaitekäytöt
10. paljon tarkkuutta vaativat telakäytöt (esimerkiksi paperikoneen pituusleikkurin painotela)

Tutkimuksessa etsittiin tehtailta myös sellaisia taajuusmuuttajasovelluksia, joissa taajuusmuuttajien käyttö olisi syklittäistä. Tavoitteena oli tutkia miten syklittäisen käytön aiheuttama suuri kytkinkomponenttien lämpötilan vaihtelu vaikuttaisi kytkinkomponenttien elinikään ja sen seurauksena taajuusmuuttajan luotettavuuteen.

Syklittäisiä sovelluskohteita esivalittiin 3 kappaletta, joista mitattiin muuttuvia parametreja kuten virtoja, jännitteitä ja IGBT-moduuleiden pinta- ja liitoslämpötiloja. Näiden mittausten avulla voitiin tehdä reaaliaikainen elinikäennuste kyseisille IGBT-moduuleille. Tulokset on esitetty luvussa 6.

## 5.2. Taajuusmuuttajien vika- ja historiatietojen kerääminen

Kun tehtaiden taajuusmuuttajakanta oli selvitetty, oli seuraavaksi määrä selvittää taajuusmuuttajien vikojen lukumäärä UPM Kaipolan ja Jämsänkosken tehtailla. Ensiksi oli päätettävä tarkasteluajanjakso, jolta vikatietoja alettaisiin kerätä. Tarkasteluajanjakson valintaan vaikutti moni asia. UPM Jokilaakson tehtailla oli otettu SAP käyttöön alku-

kesästä 2010. Sitä ennen käytössä oli ollut JOKUMA-järjestelmä. Kun vikatietoja ryhdyttiin etsimään järjestelmistä, huomattiin että SAP:n aikana vikatiedot oli kirjattu tarkemmin ja tunnollisemmin järjestelmään. JOKUMA-järjestelmän aikaiset tiedot oli siirretty SAP:iin, mutta niiden historiatietoihin ei päässyt aina käsiksi. Koska SAP oli kuitenkin ollut käytössä tehtailla vasta alle kaksi vuotta, päätettiin pidentää tarkasteluajanjaksoa, jotta saataisiin enemmän vika- ja historiatietoa taajuusmuuttajista. Tarkasteluajanjaksoksi valittiin 1.1.2007 – 1.3.2012 (yhteensä 1885 päivää), koska historiatietojen kerääminen ajalta ennen vuotta 2007 osoittautui liian hankalaksi ja epävarmaksi. Tehtaiden automaatioasentajat ja työnjohto olivat vaihtuneet niistä ajoista niin paljon, ettei edes työntekijöitä haastatteleamalla olisi saanut luotettavaa tietoa taajuusmuuttajiin liittyneistä vioista.

Kun vikatietoja ruvettiin keräämään, piti ensin määritellä mikä laskettaisiin tässä tutkimuksessa *viaksi*. Vioiksi päätettiin laskea tapahtumat, jolloin taajuusmuuttaja ei pystynyt enää suorittamaan sille annettua tehtävää eli se oli toimintakyvytön. Tutkimuksessa ilmeni paljon tapauksia, jossa esimerkiksi taajuusmuuttajan oma ohjauspaneeli oli hajonnut, mutta taajuusmuuttaja hoiti kuitenkin edelleen päätyönsä eli moottorin ohjaamisen oikein. Tällaisia tapauksia ei laskettu vioiksi.

### 5.2.1. Tiedonkeräysmenetelmiä

Taajuusmuuttajien vika- ja historiatietojen kerääminen osoittautui helpoksi SAP:n käyttöönoton jälkeiseltä ajalta. Ajanjakson alkupuolen tiedot olivat hankalia löytää ja niitä ei ollut yhtä selkeästi saatavilla kuin loppupuoliskon tiedot. Onneksi kuitenkin vanhan järjestelmän, JOKUMA:n, tiedot olivat ainakin osittain siirretty SAP:iin. Hakutoimintoa käyttämällä pystyi etsimään tehtaan sisäisiä työtilauksia erilaisilla hakusanoilla SAP:sta.

Käyttämällä hakusanoja ”Taajuusmuuttaja”, ”Taajuusmuuttajan vaihto”, ”Taajuusmuuttajan korjaus” saatiin lopulta varsin kattava lista vioista koko tarkasteluajanjaksolta. Jokainen työtilaus piti käydä erikseen läpi ja tarkastaa, täyttikö kyseinen työtilaus taajuusmuuttajan vian määritelmän. Jos työtilauksen otsikko oli esimerkiksi ”Taajuusmuuttajan korjaus”, ja työtilauksen kuvauksesta paljastui että taajuusmuuttajaan oli vaihdettu uusi näyttöpaneeli vanhan rikkiäisen tilalle, kyseinen työtilaus poistettiin listasta, sillä se ei täyttänyt tässä tutkimuksessa määriteltyä vian määritelmää.

Toinen merkittävä tapa löytää tietoa vikatapahtumista oli taajuusmuuttajien kunnostustyötilausrekisteri. SAP:sta oli mahdollista tulostaa kesäkuun 2010 jälkeiset tapahtumat, jolloin taajuusmuuttaja oli lähetetty UPM:n ulkopuoliseen huoltoon. Suurin osa kyseisistä kunnostustyötilauksista käsitteli samoja vikaantuneita taajuusmuuttajia, jotka olivat löytyneet työntekijöiden tekemien pelkkien työtilausten perusteella. Kunnostustyötilaukset antoivat kuitenkin joskus työtilauksia parempaa kuvausta taajuusmuuttajan viasta. Kunnostustyötilauksen perusteella oli mahdollista selvittää kyseisen huollon osottilausnumero, jonka avulla huoltopalvelusta oli mahdollista saada hajonneen taajuusmuuttajan huoltoraportti sekä sarjanumero.

Vikaantuneiden taajuusmuuttajien sarjanumerot kertovat, milloin kyseinen laite on valmistettu. Kun lisäksi tiedetään taajuusmuuttajan vikaantumispäivämäärä, on mah-

dollista laskea taajuusmuuttajan elinikä, eli kauanko taajuusmuuttaja oli toimintakykyinen. Tehtaille tilataan taajuusmuuttajat pääosin tilaustyönä, eli niiden valmistuspäivämäärät ovat varsin lähellä niiden käyttöönottopäivämääriä. Taajuusmuuttajan sarjanumero lukee kyseisen taajuusmuuttajan kyljessä ja se on yksilökohtainen. Ongelmaksi muodostui vikaantuneiden taajuusmuuttajien sarjanumeroiden saaminen, sillä niitä ei ollut sähköisesti mistään saatavilla. Sarjanumeroiden selvittäminen aiheutti kohtuuttomasti työtä. Suurimassa osassa vikaantuneita taajuusmuuttajia ei ollut mitään huolto-raportteja saatavilla, joten myöskään sarjanumeroita ei saatu selville. Näin ollen taajuusmuuttajien eliniän kattavaa selvitystä ei tässä työssä pystytty tekemään.

SAP:n lisäksi vikatietoja kerättiin tehtaiden automaatioasentajien ja automaation työnjohdon haastatteluilla. Haastatteluissa kävi ilmi yleisimpiä tyyppivikoja sekä tärkeää lisätietoa, joita SAP:n työtilauksista ei selvinnyt. Ilmeni myös muutamia taajuusmuuttajavikaantumisia, joiden vaihdosta ei ollut tehty aikoinaan työtilausta ollenkaan. Myös työntekijöiden omat muistiinpanot olivat merkittävässä roolissa tarkkojen päivämäärien ja vikakuvausten selvittämisessä. Työntekijöiden tekemien muistiinpanojen määrä ja aloitusajankohta olivat myös tärkeässä roolissa tarkasteluajanjakson valinnassa. Vuoden 2007 alusta alkoi olla selkeästi enemmän työntekijöiden muistiinpanoja vikatapauksista kuin aiemmin.

Jonkin verran taajuusmuuttajien vikatilanteita saatiin selville myös UPM:n automaation vuoropäiväkirjoista, joihin automaatiokunnossapidon vuorotyöntekijät kirjaa-vat työtapauksia. Nykyään SAP:n aikaan myös vuoromiesten täytyy tehdä SAP:iin ensin vikailmoitus, jossa kuvataan vika mahdollisimman tarkasti sekä ilmoitetaan vian toimintopaikka. Tämän jälkeen tehdään SAP:ssa työtilaus, jossa kerrotaan työn vaiheet, kesto ja tarvittavat varaosat nimikenumeroineen. Työtä tekemään tullut työntekijä leimaa itsensä kyseiselle työlle viivakoodinlukijalla, ja työstä aiheutuneet kustannukset kohdistuvat oikein kyseiselle työlle.

Myös UPM:n taajuusmuuttajien varaosien varastosaldoja tutkimalla saatiin lisätietoa taajuusmuuttajien vioista ja korjauksista. Myös UPM Kaipolan ja Jämsänkosken varastotyöntekijöiden haastattelut ja SAP:n käyttötaito olivat merkittävässä roolissa vikatietojen etsinnässä.

## 6. IGBT-MODUULEIDEN KÄYTÄNNÖN MITTAUKSET JA ELINIKÄENNUSTEEN TEKEMINEN

Alaluvussa 2.1.6. esiteltiin teoriaa taajuusmuuttajien vaihtosuuntaajissa käytettävien tehopuolijohteiden, IGBT-moduuleiden, elinikäennusteen laskennalle. Tässä luvussa esitellään yksi käytännön menetelmä moduulin vikaantumishetken ennustamiseksi.

IGBT-moduuleiden elinikäennustetta haluttiin selvittää syklisille taajuusmuuttajakäytöille, joissa tehosyklaus on erityisen suurta. Tehosyklaukseksi kutsutaan tässä tapauksessa virtakuormituksen muutoksesta aiheutunutta lämpötilan vaihtelua IGBT-moduulissa.

### 6.1. Syklinen käyttösovellus

IGBT-moduuleiden elinikäennustetta haluttiin tehdä taajuusmuuttajien syklisille käytöille. Aluksi kartoitettiin UPM Kaipolan ja Jämsänkosken sykliset taajuusmuuttajakäytöt, joista mittausten kohteeksi valittiin UPM Kaipolan tehtaan paperikone 4:n (PK4) pituusleikkuri PL41:n levitystelan taajuusmuuttajakäyttö. Kyseinen käyttö valikoitui mittaushetkeksi sen suuren käyttöasteen sekä hyvien mittaushetkellisyysvaikutusten vuoksi.

Paperikoneelta tuleva valmispaperi leikataan pituusleikkurilla asiakkaan tilaamiin mittoihin. Kyseinen PL41 levitystela käy aina, kun pituusleikkurilla pyörii paperi. Tällöin pituusleikkuri on *ajossa*. Kun asiakkaan tilaamat paperirullat ovat tulleet määrämittaansa, ne luovutetaan pituusleikkurilta pois pakkausta varten. Tätä luovutustapahtumaa kutsutaan nimellä *muutto*.

PL41 pituusleikkurilla tapahtuu keskimäärin 2,5 muuttoa tunnissa. Pituusleikkurin käyntiaika oli vuonna 2011 0,88 eli pituusleikkuri oli käynnissä 88,8 % ajasta. Vuosittaisien muuttojen määrä on siis:

$$0,888 \cdot 365 \text{ d} \cdot 24 \text{ h} \cdot 2,5 \text{ muuttoa / h} = 19447 \text{ muuttoa vuodessa}$$

Koska jokaista muuttoa seuraa uusi käynnistys, on pituusleikkuri myös ajolla 19447 kertaa vuodessa. Pituusleikkurin lähtiessä ajolle tapahtuu kiihdytys nollanopeudesta ajonopeuteen. Ajonopeus vaihtelee paperin laadusta ja ajomiehestä riippuen. Valmispaperirullan lähestyessä tavoitemittaansa, alkaa hallittu nopeuden hidastaminen ja lopulta jarrutus. Levitystelan kiihdytys, hidastus ja jarrutus toteutetaan taajuusmuuttajan avulla.

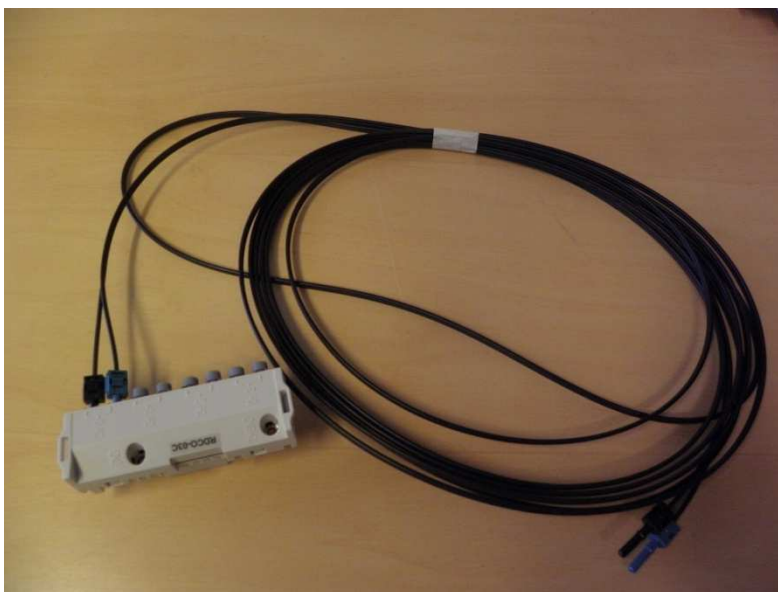
## 6.2. Menetelmä ja mittausten suoritus

PL41 levitystela ohjasi ABB:n valmistama ACS800-sarjan taajuusmuuttaja (kuva 6.1).



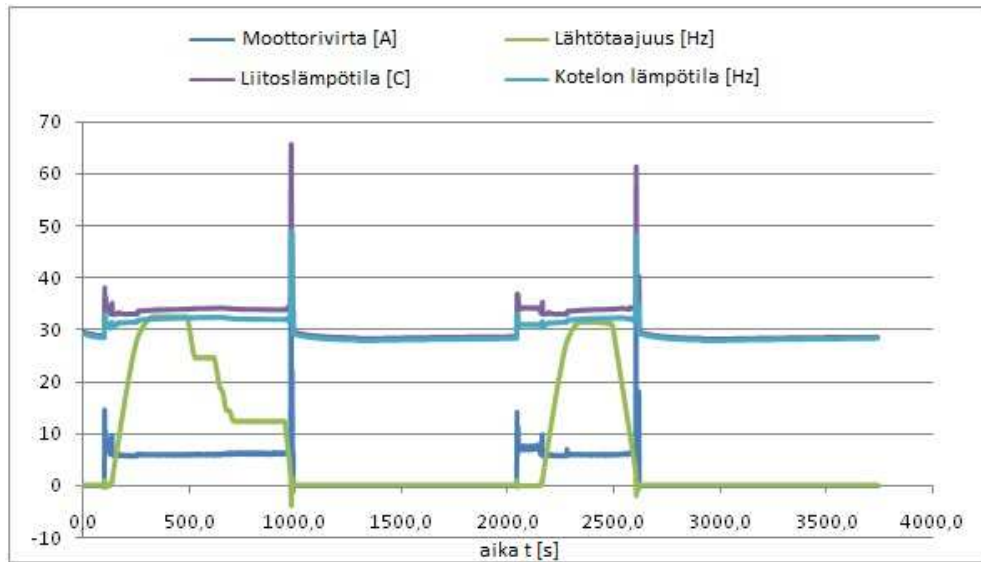
**Kuva 6.1.** PL41 levitystelan taajuusmuuttaja.

Taajuusmuuttajaan muodostettiin datayhteys optisella kuidulla ABB:n lisälaitteen RDCO-03C avulla, ja mittausohjelmalla käytettiin ABB:n DriveDebug 2.9 ohjelmistoa. Laitteisto on esitelty kuvassa 6.2.



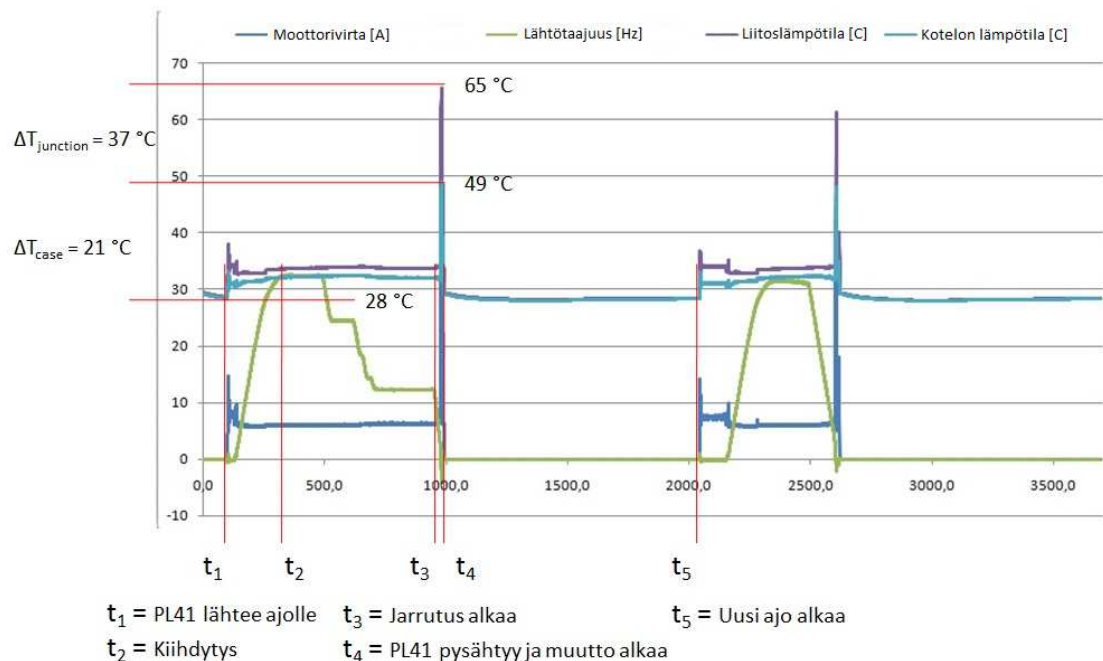
**Kuva 6.2.** Datayhteyden muodostus taajuusmuuttajaan RDCO-03C ja optisen kuituparin avulla.

Tässä elinikäennusteessa tulokset pohjautuvat virranmuutoksista aiheutuviin lämpötilan muutoksiin IGBT-moduulissa. Sen vuoksi aluksi mitattiin 0,5 s eli 500 ms näytteenottovälillä taajuusmuuttajan lähtövirtaa  $I_{out}$ , lähtötaajuutta  $f_{out}$ , IGBT-moduulin kotelon lämpötilaa  $T_{case}$  ja moduulin sisällä olevan puolijohdeliitoksen lämpötilaa  $T_{junction}$ . Kuvassa 6.3 on esitetty yleiskuva sovelluksen ajotavasta ajan funktiona.



**Kuva 6.3.** PL41-taajuusmuuttajakäytön ajotavan yleiskuva.

Kuvasta 6.3 voidaan nähdä, että ajosyklien pituus vaihtelee hieman. Kiihdytyksessä ja jarrutuksessa syntyvät kuitenkin suuret virtapiikit, jotka aiheuttavat suuret piikit myös  $T_{case}$  (kuvassa 6.3 nimellä Kotelon lämpötila) ja  $T_{junction}$  (kuvassa 6.3. nimellä Liitoslämpötila) -arvoissa. Kuvaan 6.4 on merkitty kyseisten lämpötilojen vaihteluvälit sekä ajanhetket  $t_1 - t_5$ .

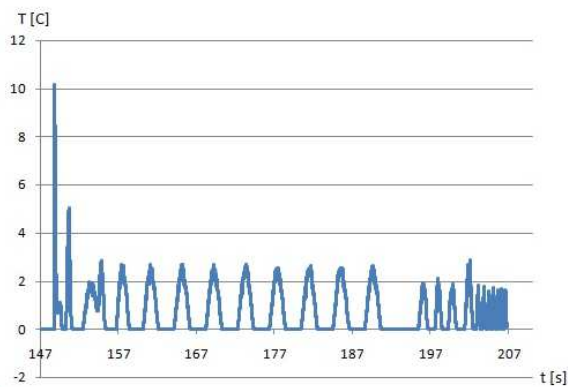


**Kuva 6.4.** PL41-käytön ajotapa sekä kriittiset arvot.

Kuvasta 6.4 nähdään, että moduulin kotelon lämpötilan muutos  $\Delta T_{\text{case}}$  on suurimmillaan 21 °C ja moduulin sisällä olevan puolijohdeliitoksen lämpötilan muutos  $\Delta T_{\text{junction}}$  on suurimmillaan 37 °C eli liitos tekee yhden 37 °C syklin.

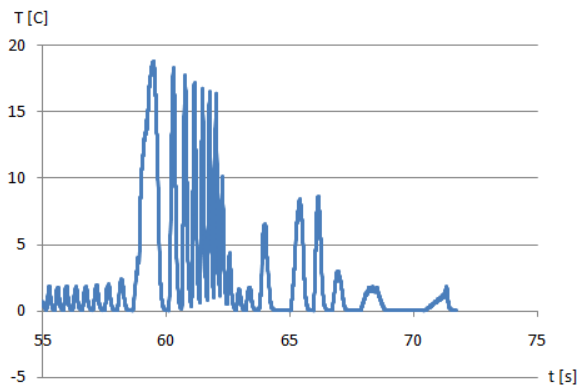
Taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajassa on kuitenkin kuusi kappaletta IGBT-moduuleita ja kyseiset parametrit, Kotelon lämpötila ja Liitoslämpötila, ilmoittavat aina suurimman lämpötila-arvon kaikista kuudesta mittaamastaan moduulista. Koska tässä tutkimuksessa tehdään elinikäarviota yhdelle tietylle IGBT-moduulille, tulee lisäksi mitata yhden yksittäisen moduulin puolijohteen lämpötilan vaihteluita. Valitaan mitattavaksi moduuliksi taajuusmuuttajan lähdön A-vaiheen yläpuolen (lähdön ja välipiirin positiivisen kiskon välinen) IGBT.

Kuvassa 6.5 on esitetty kyseisen IGBT:n lämpötilan vaihtelut taajuusmuuttajan kiihdytyksessä tapahtuvan piikin kohdalla. Mittauksen näytteenottoväli on 0,004 s eli 4 ms.



**Kuva 6.5.** A-vaiheen yläpuolisen IGBT-moduulin puolijohdeliitoksen lämpötilan vaihtelut kiihdytyksessä.

Kuvasta 6.5 huomataan, että levitystelan kiihdytyksessä tapahtuu aluksi yksi 10 °C lämpötilan vaihtelu, sitten yksi 5 °C lämpötilan vaihtelu ja lopuksi 24 kappaletta keskimäärin 3 °C lämpötilan vaihteluita. Kuvassa 6.6 on esitelty levitystelan jarrutuksessa tapahtuneet lämpötilan vaihtelut.



**Kuva 6.6.** A-vaiheen yläpuolisen IGBT-moduulin puolijohdeliitoksen lämpötilan vaihtelut jarrutuksessa.

Kuvasta 6.6 huomataan, että levitystelan jarrutuksessa tapahtuu aluksi kahdeksan kappaletta  $2 - 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilan vaihteluita, sitten seitsemän kappaletta keskimäärin  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilan vaihteluita, jonka jälkeen neljä kappaletta noin  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  sekä kuusi kappaletta keskimäärin  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilan vaihtelua.

### 6.3. Elinikäennusteen laskeminen

Pituusleikkuri PL41:n levitystelan taajuusmuuttajakäyttö siis kiihdyttää ja jarruttaa keskimäärin 19 447 kertaa vuodessa ja jokaisessa kiihdytyksessä ja jarrutuksessa tulee yhteensä seuraava määrä lämpötilanvaihtelusyklejä:

- $N(\Delta T_{\text{junction}}(37\text{ }^{\circ}\text{C})) = 1$  kappale ( $28\ldots 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- $N(\Delta T_{\text{junction}}(17\text{ }^{\circ}\text{C})) = 7$  kappaletta ( $28\ldots 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- $N(\Delta T_{\text{junction}}(10\text{ }^{\circ}\text{C})) = 1$  kappale ( $28\ldots 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- $N(\Delta T_{\text{junction}}(8\text{ }^{\circ}\text{C})) = 4$  kappaletta ( $28\ldots 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- $N(\Delta T_{\text{junction}}(3\text{ }^{\circ}\text{C})) = 37$  kappaletta ( $28\ldots 31\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

IGBT-puolijohteiden valmistajilta saadaan kuvaajia, joiden perusteella voidaan laskea suurimmat sallitut syklimäärät kyseisillä lämpötilarajoilla (liite 1). Tässä työssä on kuitenkin käytetty laskuihin erään laitevalmistajan sisäisiä dokumentteja, joissa kuvaajia on ekstrapoloitu, eli jatkettu käyrien ulkopuolelle näkyvästä käyrästä päättelemällä oikeanlainen kulmakerroin. Näiden ekstrapoloitujen kuvaajien perusteella saatiin suurimmiksi sallituiksi syklimääriksi:

- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(37\text{ }^{\circ}\text{C})) = 10\,712\,593$  kappaletta
- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(17\text{ }^{\circ}\text{C})) = 6\,427$  miljoonaa kappaletta
- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(10\text{ }^{\circ}\text{C})) = 504\,873$  miljoonaa kappaletta
- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(8\text{ }^{\circ}\text{C})) = 3\,162\,625$  miljoonaa kappaletta
- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(3\text{ }^{\circ}\text{C})) =$  Liian paljon

Tuloksista huomataan, että mitä suurempi lämpötilanvaihtelualue on, sitä vähemmän syklejä IGBT kestää. Huomataan myös, että  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilan vaihtelu ei mahdu asteikolle, joten sen merkitys puolijohteen kokonaissyklikestossa on merkityksettömän pieni. Suurimmat sallittujen syklien määrät lasketaan kappalemääriä painottaen yhteen kaavan (6, s. 19) mukaan. Pienin eli  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  sykli on jätetty laskusta pois, koska sen merkitys on niin pieni kokonaisuuden kannalta.

$$\left( \frac{1}{N_f(\Delta T(37\text{ }^{\circ}\text{C}))} + \frac{7}{N_f(\Delta T(17\text{ }^{\circ}\text{C}))} + \frac{1}{N_f(\Delta T(10\text{ }^{\circ}\text{C}))} + \frac{4}{N_f(\Delta T(8\text{ }^{\circ}\text{C}))} \right) * x = 1$$

$$x = \frac{1}{\left( \frac{1}{N_f(\Delta T(37\text{ }^{\circ}\text{C}))} + \frac{7}{N_f(\Delta T(17\text{ }^{\circ}\text{C}))} + \frac{1}{N_f(\Delta T(10\text{ }^{\circ}\text{C}))} + \frac{4}{N_f(\Delta T(8\text{ }^{\circ}\text{C}))} \right)}$$

$$x \approx 10\,588\,680$$



Kyseinen IGBT-moduuli kestää siis 10,6 miljoonaa sykliä ennen kuin hajoaa. Koska pituusleikkuri PL41:lla on keskimäärin 19447 sykliä vuodessa, niin kyseisen taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan A-vaiheen ylemmän IGBT-moduulin elinikäennuste on:

$$\frac{10\,588\,680 \text{ sykliä}}{19447 \text{ sykliä vuodessa}} = 544 \text{ vuotta}$$

Tuloksesta voidaan päätellä, että syklisestä käytöstä aiheutuvat lämpötilan vaihtelut tuskin ovat elinikää rajoittava tekijä kyseisessä taajuusmuuttajassa. Jos taas esimerkiksi kiihdytyksessä ja jarrutuksessa syntyneet IGBT-moduulin puolijohdeliitosten lämpötilan vaihtelut olisivat olleet esimerkiksi 10 °C suurempia olisivat syklien määrät seuraavat:

- $N(\Delta T_{\text{junction}}(47\text{ °C})) = 1 \text{ kappale } (28 \dots 75\text{ °C})$
- $N(\Delta T_{\text{junction}}(27\text{ °C})) = 7 \text{ kappaletta } (28 \dots 55\text{ °C})$
- $N(\Delta T_{\text{junction}}(20\text{ °C})) = 1 \text{ kappale } (28 \dots 48\text{ °C})$
- $N(\Delta T_{\text{junction}}(18\text{ °C})) = 4 \text{ kappaletta } (28 \dots 46\text{ °C})$
- $N(\Delta T_{\text{junction}}(13\text{ °C})) = 37 \text{ kappaletta } (28 \dots 41\text{ °C})$

Edellisistä saadaan määritettyä sykliektot ekstrapoloitujen kuvaajien avulla:

- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(47\text{ °C})) = 1\,926\,569 \text{ kappaletta}$
- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(27\text{ °C})) = 143\,046\,826 \text{ kappaletta}$
- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(20\text{ °C})) = 1\,689 \text{ miljoonaa kappaletta}$
- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(18\text{ °C})) = 4\,017 \text{ miljoonaa kappaletta}$
- $N_f(\Delta T_{\text{junction}}(13\text{ °C})) = 58\,368 \text{ miljoonaa kappaletta}$

Kaavan (9, s. 20) mukaan IGBT kestäisi tällöin 1 753 727 sykliä ennen kuin hajoaisi. IGBT-moduuli kestäisi tällöin PL41 levitystelan käytössä:

$$\frac{1\,753\,727 \text{ sykliä}}{19447 \text{ sykliä vuodessa}} = 90 \text{ vuotta}$$

Kymmenen celsiusasteen nousu puolijohdeliitosten lämpötilan vaihteluissa pudottaisi IGBT-moduulin elinikäennustetta 544 vuodesta 90 vuoteen. Teollisuudessa on kuitenkin paljon käyttöjä, joissa tehosyklausta tapahtuu vielä paljon voimakkaammin (suurempia lämpötilan muutoksia ja useammin), ja moduulin elinikäennuste voi olla vain joitain vuosia. Tällaisiin käyttöihin kannattaisi vaihtaa IGBT-moduuleita ennakkohuoltona sopivin väliajoin. Olisikin tärkeää tietää millaiseen sovellukseen taajuusmuuttaja on asennettu.

On myös huomioitava, että jokaisessa PL41 levitystelan kiihdytys-jarrutus-syklissä IGBT-moduulin kotelon lämpötilassa ( $\Delta T_{\text{case}}$ ) tapahtuu 21 celsiusasteen lämpötilan vaihtelu. Tämä vaikuttaa myös IGBT:n elinikäennusteeseen. IGBT-moduulien valmistajilla on olemassa kuvaajat myös IGBT:n kotelon lämpötilan muutoksen kestoille (liite 2). Tässä tapauksessa IGBT-moduuli kestää 21 celsiusasteen lämpötilan muutoksia noin 1 500 000 kertaa. Kun kyseinen levitystelan käyttö tekee 19 447 sykliä vuodessa, saadaan sitä kautta moduulin elinikäennusteeksi:

$$\frac{\sim 1\,500\,000 \text{ sykliä}}{19\,447 \text{ sykliä vuodessa}} = \text{noin } 77 \text{ vuotta}$$

Tässä tapauksessa moduulin kotelon lämpötilan muutokset ovat elinikää rajaava tekijä puolijohdeliitosten lämpötilan muutosten sijaan.

## 7. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä luvussa tarkastellaan objektiivisesti eri taajuusmuuttajavalmistajien suoriutumista tutkimuksessa käyttövarmuuden ja luotettavuuden saralla. Luvussa tarkastellaan myös, miten ikä vaikuttaa taajuusmuuttajien luotettavuuteen, sekä mitkä olivat tutkimuksen mukaan suurimmat ongelmat ja vianaiheuttajat. Luvussa otetaan myös kantaa siihen, että miten luotettavuutta voisi parantaa ja kuinka paljon se aiheuttaisi kustannuksia suhteessa taajuusmuuttajan elinkaarikustannuksiin.

### 7.1. Taajuusmuuttajien suoriutuminen teollisessa ympäristössä

Tutkimuksessa kävi ilmi useita erilaisia vikatapauksia. Paljon vikojen syitä jäi myös selvittämättä siitä syystä, että vikaantunutta taajuusmuuttajaa ei ollut lähetetty huoltoon ollenkaan. Pienimpiä ja halvimpia taajuusmuuttajia ei kohdeyrityksen tehtailla lähetetty huoltoon kustannussyistä, vaan tilalle laitettiin uusi vastaava taajuusmuuttaja. Vikojen yhteismäärä oli tutkimuksen aikavälillä 1.1.2007 – 1.3.2012 yhteensä 72 kappaletta. Tarkasteluajanjakso käsittää yhteensä 1 885 päivää, joten keskimääräinen vikaantumisaika kaikkien taajuusmuuttajien tapauksessa kaavan (26) mukaan oli:

$$MTBF = \frac{1885 \text{ päivää}}{72 \text{ vikaa}} = 26 \text{ päivää}$$

Vikaantumattomien taajuusmuuttajien lukumäärä tutkimuksen aikavälillä oli 1242 kappaletta. Taajuusmuuttajien luotettavuus kohdeyrityksen tehtailla tutkimuksen aikavälillä oli kaavan (12) mukaan:

$$R(t) = \frac{1242}{1314} = 0,945 \approx 95 \%$$

Vikakuvausten, huoltoraporttien sekä haastattelujen perusteella selvisi yleisimmät ja eniten harmia kyseisillä paperitehtailla aiheuttaneet vikatyypit, jotka on esitelty luvussa 7.1.1.

#### 7.1.1. Taajuusmuuttajien yleisimmät vikatyypit

**Puhallinviat:** Taajuusmuuttajien puhallinongelmat olivat suurin yksittäinen vian aiheuttaja paperitehtailla. Jäähdytyspuhaltimet ovat taajuusmuuttajan ainut mekaanisesti kuuluva osa, ja se suositellaan vaihdettavan määräjain. Puhaltimien toimimattomuudesta

aiheutui tarkasteluvälillä useita yllälämpenemisongelmia, jotka johtivat taajuusmuuttajan pysähtymiseen tai rikkoutumiseen. Taajuusmuuttajien jäähdytyspuhaltimien laakereiden taso on tutkimuksen mukaan huonontunut viime vuosina, joka on johtanut puhaltimien lyhyempään vaihtoväliin. Myös laitevalmistajien suosittelemat jäähdytyspuhaltimien vaihtovälit ovat lyhentyneet viime vuosien aikana.

**Taajuusmuuttajan piirikortit:** Taajuusmuuttajassa on useita matalalla jännitteellä toimivia piirikortteja, joita käytetään mitta- ja ohjaustoimintojen suorittamiseen sekä ulkoisia liitäntöjä varten. Piirikorttien ongelmat johtuvat useasti korroosiosta, jota voidaan estää lakkapinnoitteisilla piirikorteilla, joita on saatavilla taajuusmuuttajiin lisäoptioina. Myös piirikorttien elektrolyyttikondensaattorit vanhenevat ja vaativat vaihtoa aika-ajoin. Huomioitavaa on myös varaosina säilytettävien piirikorttien kunto: Piirikorteissa käytettävät elektrolyyttikondensaattorit kuivuvat jos niitä säilytetään pitkiä aikoja jännitteettömänä tehtaan varastossa. Tämän vuoksi hajonneen kortin tilalle vaihdettu ”uusi” piirikortti on saattanut hajota vuoden sisään asennuksesta ja aiheuttaa taajuusmuuttajan vikaantumisen. Varastossa säilytettäviin piirikortteihin olisi hyvä merkitä niiden valmistus- ja toimituspäivämäärä, jotta niiden kunto voitaisiin arvioida ennen paikalleen asennusta.

**Liittimet:** Taajuusmuuttajan sisällä erilaisia moduuleita on yhdistetty toisiinsa kaapelein ja liittimin. Korrosio, lämpötila ja aika kuitenkin haurastavat liittimien muovikuoria, jotka usein huollon yhteydessä saattavat murentua tai pahimmassa tapauksessa vioittunut liitin saattaa jäädä huomaamatta. Vioittuneet liittimet aiheuttavat katkoja tiedonkulussa ja ongelmia taajuusmuuttajien toiminnassa. Kohdeyrityksen automaatioasentajien tekemien lämpökamerakuvausten perusteella joskus myös liian löysälle jäänyt syöttökaapelin tai moottorikaapelin vaihejohdon liitin on saattanut ylikuumentua.

**Kytinkomponentit:** Taajuusmuuttajan päävirtapiiriin kytinkomponenttien läpi kulkee suuria määriä tehoa, ja niiden kynnysjännitteestä johtuen kytinkomponenteissa tapahtuu myös suurehkoja tehohäviöitä. Tehohäviöt aiheuttavat lämpöä, ja liiallinen lämpö aiheuttaa komponenttien ikääntymistä. Komponenttien epätasalaatuisuudesta sekä hie- man erilaisista ympäristöolosuhteista johtuen joku kytinkomponenteista saattaa ikään- tyä muita aikaisemmin. Varsin yleinen vika kohdeyrityksen paperitehtaiden taajuus- muuttajissa oli taajuusmuuttajan vikailmoitus ”saturaatio”. Tämä vikailmoitus tarkoittaa sitä, että kytinkomponentin yli oleva jännite johtavassa tilassa on kasvanut liian suu- reksi. Kyseinen vika voi johtua kolmesta eri syystä: moottorikaapelin oikosulusta, yli olevan jännitteen mittausrvirheestä tai kyseisen kytinkomponentin viallisuudesta. [24]

#### 7.1.2. Lämpötilan ja jäähdytyksen vaikutukset

Liiallista lämpökuormaa voidaan pitää suurena taajuusmuuttajien vikojen aiheuttajana. Ylikuumentuminen voi johtua joko a) väärin mitoitetusta taajuusmuuttajasta, b) taajuus-

muuttajan oman jäähdytyspuhaltimen alimitoituksesta tai toimimattomuudesta tai c) sähkötilan puutteellisesta jäähdytyksestä.

UPM Kaipolan ja Jämsänkosken paperitehtailla on yli sata sähkötilaa, jotka sisältävät taajuusmuuttajia. Sähkötilojen jäähdytyksessä varsinkin kesäkuukausina on ollut perinteisesti suuria eroja. Suurimmassa osassa sähkötiloista jäähdytys toimii hyvin, mutta osassa jäähdytys on kuumimpina päivinä puutteellinen, mikä aiheuttaa sähkötilassa olevien laitteiden mahdollista yllilämpöä ja ennenaikaista ikääntymistä.

### 7.1.3. Ympäristön ilmanlaadun vaikutukset luotettavuuteen

Puhallinjäähdytteiset taajuusmuuttajat ottavat korvausilmansa yleensä suoraan sähkötilan ilmasta. Sähkötilat puolestaan ottavat korvausilmansa usein tehdassalin ilmasta, jolloin tehdassalin ilmanlaatu vaikuttaa myös taajuusmuuttajaan. Tutkimuksessa kävi ilmi, että yhdellä tutkimusympäristön paperikoneista oli paljon korroosiota aiheuttavia kemikaaleja tehdassalin ilmassa. Kyseisellä paperikoneella oli tehty ilmanlaatumittauksia vuonna 2008. Mittaustuloksista oli käynyt ilmi, että ilmassa oli paljon rikkihajoista kaasua, joka syövyttää hopeaa erittäin tehokkaasti. Hopeaa käytetään yleisesti tehoelektronikan johtimissa ja liitännöissä sekä piirikorttien komponenteissa.

Kohdeyrityksen tehtailla onkin ollut jo vuosia ohje, että taajuusmuuttajat tulisi tilata lakkapinnoitteisilla piirikorteilla, jottei huonon ilmanlaadun tai liiallisen ilmankosteuden aiheuttama korrosio pääsisi syövyttämään piirikortteja.

## 7.2. Eri taajuusmuuttajavalmistajien suoriutuminen tutkimuksessa

Tässä osiossa esitellään, miten eri valmistajien taajuusmuuttajat sijoittuivat tutkimuksessa. Tarkastellaan mitkä ovat Valmistajan A ja Valmistajan B väliset erot luotettavuudessa, eli mikä on vikojen suhde taajuusmuuttajien kokonaismäärään. Taulukossa 7.1 on esitelty taajuusmuuttajien vikajakaantuminen teholuokittain.

**Taulukko 7.1.** *Taajuusmuuttajien vikajakaantuminen teholuokittain.*

Teholuokka	Tamut yht.	Viat yht.	Kokonaissuhde
0 - 7,5 kW	538	17	0,032
7,5 - 37 kW	329	17	0,052
37 - 250 kW	359	31	0,086
>250 kW	77	7	0,091

Taulukosta 7.1 voidaan karkeasti päätellä, että mitä suurempi taajuusmuuttaja on tehollaan, sitä suurempi vikaantumisprosentti sillä on. Suuremmissa taajuusmuuttajissa on suuremmat virrat ja sen seurauksena suurempi lämmöntuotto, joten jäähdytys nousee entistä suurempaan rooliin. Tilastoista voidaan myös päätellä, että suurempien taajuusmuuttajien viat on kirjattu tarkemmin muistiin, joten vikoja vaikuttaisi olevan suhteessa enemmän. Usein suuret taajuusmuuttajat ovat merkittävässä roolissa paperinvalmistus-

prosessissa, joten niiden vikaantumiset otetaan erittäin vakavasti. Suurten taajuusmuuttajien vikaantuminen voi tarkoittaa myös piikkiä energian kulutuksessa, jos moottoria joudutaan ajamaan hetkellisesti suorakäyttöisesti. Taulukossa 7.2 on esitelty Valmistaja A:n taajuusmuuttajien vikajakaantuminen teholuokittain.

**Taulukko 7.2.** *Valmistaja A:n taajuusmuuttajien vikajakaantuminen teholuokittain.*

Teholuokka	Valmistaja A -tamut	Valmistaja A -viat	Valmistaja A -suhde
0 - 7,5 kW	246	7	0,028
7,5 - 37 kW	127	7	0,055
37 - 250 kW	207	8	0,039
>250 kW	63	6	0,095

Taulukosta 7.2 nähdään, että teholuokissa 0 – 7,5kW ja 37 – 250kW Valmistaja A:n taajuusmuuttajat ovat kohdeyrityksen tehtaiden keskiarvon alapuolella (Valmistaja A:t vikaantuneet keskiarvoa harvemmin). Teholuokissa 7,5 – 37 kW ja yli 250 kW taas Valmistaja A on vähän keskiarvon yläpuolella (Valmistaja A:t ovat vikaantuneet keskiarvoa useammin). Kaikkien Valmistaja A:n taajuusmuuttajien vikojen suhde oli 0,044 eli tarkasteluajanjakson aikana 4,4 % Valmistaja A:n kaikista taajuusmuuttajista vikaantui.

Taulukossa 7.3 on esitelty Valmistaja B -taajuusmuuttajien vikaantumiset teholuokittain kohdeyrityksen paperitehtailla.

**Taulukko 7.3.** *Valmistaja B -taajuusmuuttajien vikajakaantuminen teholuokittain.*

Teholuokka	Valmistaja B -tamut	Valmistaja B -viat	Valmistaja B -suhde
0 - 7,5 kW	284	10	0,035
7,5 - 37 kW	191	10	0,052
37 - 250 kW	150	23	0,153
>250 kW	14	1	0,071

Taulukosta 7.3 nähdään, että teholuokassa 37 – 250kW Valmistaja B -taajuusmuuttajat ovat selkeästi kohdeyrityksen tehtaiden keskiarvon yläpuolella. (Valmistaja B:t ovat vikaantuneet keskiarvoa selkeästi useammin). Kaikkien Valmistaja B -taajuusmuuttajien vikojen suhde oli 0,069 eli tarkasteluajanjakson aikana 6,9 % Valmistaja B:n kaikista taajuusmuuttajista vikaantui.

Yleisesti ottaen Valmistaja A:n taajuusmuuttajat olivat tutkimuksen mukaan keskimäärin luotettavampia kuin Valmistaja B:n taajuusmuuttajat. Kohdeyrityksen työntekijöitä haastatteleamalla selvisi, että uusien taajuusmuuttajien merkki määräytyy projekteissa yleensä hankintahinnan perusteella. Ensin projektiin tarvittavat taajuusmuuttajat määritellään ja sen jälkeen niiden yhteishankintahinta kilpailutetaan eri laitevalmistajilla. Kohdeyrityksen tehtailla taajuusmuuttajien luotettavuutta ei ole ennen tutkittu. Tästä voidaan päätellä, että kohdeyrityksessä hankintahinta on merkittävämpi tekijä päätöksenteossa kuin taajuusmuuttajan luotettavuus.

### 7.3. Olosuhteet ja niiden vaikutukset tuloksiin

Lähes kaikki kohdeyrityksen paperitehtaiden taajuusmuuttajat olivat asennettu sähkötiloihin oikeaoppisesti. Muutama taajuusmuuttaja oli jouduttu sijoittamaan huonoihin olosuhteisiin kentälle, mutta niiden taajuusmuuttajien suojausluokan valintaan oli kiinnitetty riittävästi huomiota. Tehtailla on yleensä yli sata sähkötilaa, joten kaikkien sähkötilojen ympäristöolosuhteiden tutkiminen ei ollut tässä tutkimuksessa mahdollista. Tutkimuksessa päätettiin ottaa tarkempaan tarkasteluun yhden keskeisen sähkötilan lämpötila- ja kosteusarvojen vaihtelut.

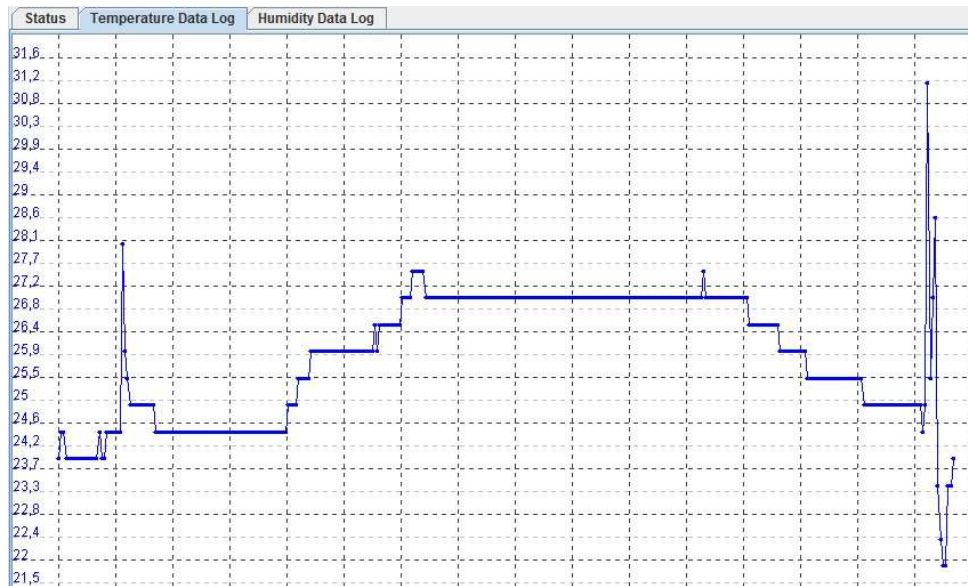
#### 7.3.1. Sähkötilan lämpötila- ja kosteusarvot

Työssä haluttiin tutkia sähkötilojen lämpötilan ja suhteellisen kosteusprosentin vaihtelua. Mittaukset suoritettiin iButton DS1923-lämpötila- ja kosteusantureilla ja tulokset luettiin saman valmistajan DS1402D-lukulaitteella (kuva 7.1). Mitta-anturit sijoitettiin taajuusmuuttajan jäähdytysilman ottokanavan välittömään läheisyyteen, jotta saataisiin selville, kuinka paljon sisään virtaavan ilman lämpötila- ja kosteusarvot vaihtelevat. Taajuusmuuttaja pyrkii pitämään sisälämpötilansa vakiona.



**Kuva 7.1.** Lämpötilan ja suhteellisen kosteusprosentin mittaamiseen käytetyt laitteet.

Kuvassa 7.2 on esitetty yhden vuorokauden lämpötilan vaihtelut Kaipolan PK4-sähkötilassa aikavälillä 3.7. – 4.7.2012.



**Kuva 7.2.** Vuorokauden lämpötilan vaihtelut Kaipolan PK4-sähkötilassa 3.7. – 4.7.2012. Kuvaajan pystyakselilla lämpötila celsiusasteina ja vaaka-akselilla aika.

Kuvasta 7.2 nähdään, että sähkötilan lämpötila vaihtelee noin 3 - 4 celsiusasteen verran vuorokauden aikana. Kuvassa 7.3 on esitetty yhden vuorokauden suhteellisen kosteusprosentin vaihtelut Kaipolan PK4-sähkötilassa aikavälillä 3.7. – 4.7.2012.

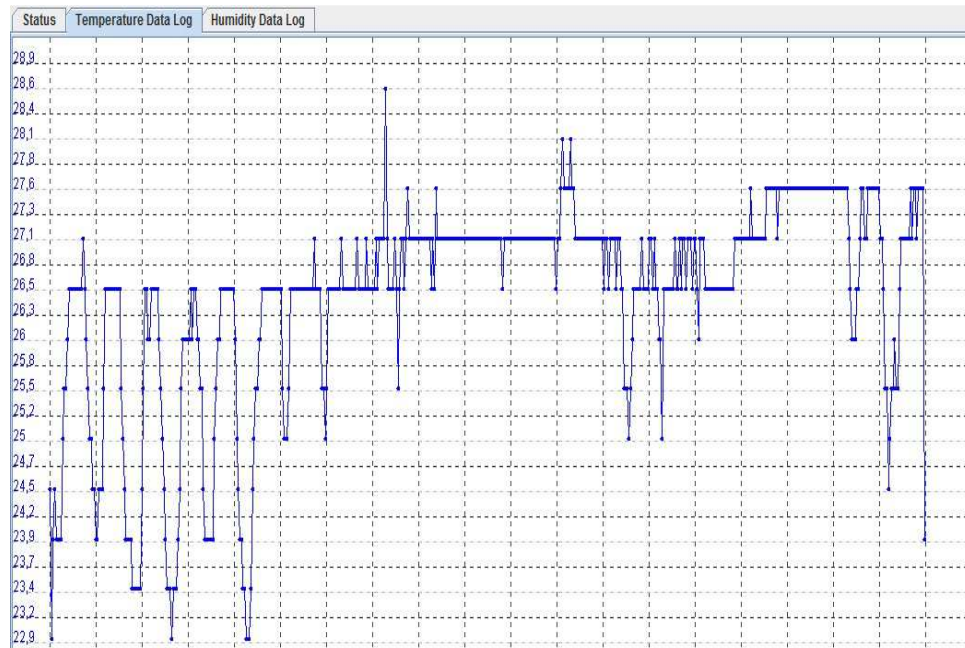


**Kuva 7.3.** Vuorokauden suhteellisen kosteusprosentin vaihtelut Kaipolan PK4-sähkötilassa aikavälillä 3.7. – 4.7.2012. Kuvaajan pystyakselilla suhteellinen kosteusprosentti ja vaaka-akselilla aika.

Kuvasta 7.3 nähdään, että sähkötilan suhteellinen kosteusprosentti vaihteli aikavälillä 3.7. – 4.7.2012 noin 20 prosenttiyksikön verran.

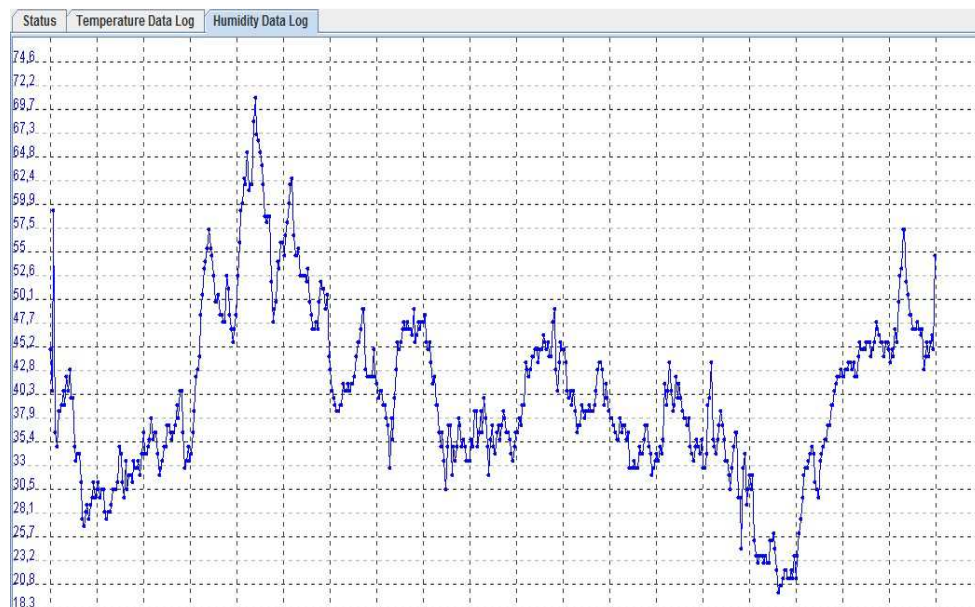
Kuvassa 7.4 on esitetty saman sähkötilan lämpötilan vaihtelut pidemmällä aikavälillä 3.7. – 26.7.2012.





**Kuva 7.4.** Lämpötilan vaihtelut Kaipolan PK4-sähkötilassa 3.7. – 26.7.2012 välillä. Kuvaajan pystyakselilla lämpötila celsiusasteina ja vaaka-akselilla aika.

Kuvasta 7.4 nähdään, että lämpötila vaihtelee pääasiassa vuorokausirytmien mukaisesti: yöllä sähkötilaan tuleva ilma on keskimäärin noin neljä celsiusastetta viileämpää. Kuvassa 7.5 on esitetty saman sähkötilan suhteellisen kosteusprosentin vaihtelut samalla aikavälillä 3.7. – 26.7.2012.



**Kuva 7.5.** Suhteellisen kosteusprosentin vaihtelut Kaipolan PK4-sähkötilassa 3.7. – 26.7.2012 välillä. Kuvaajan pystyakselilla suhteellinen kosteusprosentti ja vaaka-akselilla aika.

Mittaukset suoritettiin Kaipolan PK4 sähkötilassa alkaen 3.7.2012. Vuorokauden mittaukset päättyivät 4.7.2012 ja pidemmät mittaukset päättyivät 26.7.2012. Kuvista 7.2 ja 7.3 huomataan, että sähkötilan lämpötila- ja kosteusarvot vaihtelevat varsin paljon eri vuorokauden aikoina. Tämä johtuu siitä, että kyseinen sähkötila ottaa jäähdytysilmansa tehdassalista, joka taas ottaa jäähdytysilmansa suoraan ulkoilmasta. Koska ulkoilman lämpötila- ja kosteusarvot voivat vaihdella suuresti eri vuorokauden aikoina, myös sähkötilan ilman arvot voivat kokea suuria muutoksia päivän ja yön välillä. Paperinvalmistusprosessissa tapahtuvat muutokset vaikuttavat sali-ilman arvoihin ja sitä kautta sähkötilan lämpötilaan ja suhteelliseen kosteusprosenttiin.

Kuvista 7.4 ja 7.5 käy vielä selvemmin esille eri vuorokauden ajoista johtuvat lämpötilan vaihtelut. Kosteusprosentin hitaampi muutos alaspäin taas johtuu sateisen kauden vaihdoksesta poutaisemmaksi. Samoihin aikoihin myös PK4 paperikoneella oli pidempi huoltoseisokki, joten paperinvalmistusprosessista haihtuvan veden määrä väheni selvästi ja vaikutti näin myös sähkötilojen ilmakeitoon.

Lämpötilojen ja kosteusprosenttien vaihtelusta huolimatta, kaikki mitatut arvot pysyvät taajuusmuuttajien sallimissa lämpötila- ja kosteusrajoissa. Mittaustulokset kuitenkin osoittavat, että sähkötilojen olosuhteet elävät varsin paljon.

## 7.4. Kunnossapito

Tässä osiossa käsitellään taajuusmuuttajien kunnossapitoa. Tutkimuksen paperitehtailla automaatioasentajat tekevät yleensä yksinkertaiset huollot, kuten jäähdytyspuhaltimien vaihdot. Kunnossapito on resursseista johtuen usein niin sanottua korjaavaa kunnossapitoa, eli ennakkohuoltoa ei aina ehditä tekemään. Taajuusmuuttajien luotettavuuden kannalta olisi toki erittäin tärkeää suorittaa huollot ajallaan laitevalmistajien huolto-ohjeiden mukaisesti, mutta näin ei todellisuudessa usein tutkimuksen paperitehtailla tapahdu.

Laitevalmistajat tarjoavat erilaisia ennakkohuoltopaketteja sekä päivityspaketteja taajuusmuuttajilleen, mutta tutkimuksen paperitehtailla kyseisiä paketteja ei usein ollut ostettu. Päätöstä perusteltiin taajuusmuuttajien suurella määrällä, jolloin huoltopaketteja pitäisi ostaa käytännössä koko ajan, ilman selvää näyttöä niiden vaikutuksesta taajuusmuuttajien luotettavuuteen. Huoltopaketit olivat haastattelujen perusteella liian kalliita niistä saatavaan mahdolliseen hyötyyn nähden. Huoltopakettien hinnat perustuvat huoltotoimenpiteiden määrään sekä toimittajan ja asiakkaan väliseen sopimukseen huollon hinnasta.

Yhden huoltomiehen kahdeksan tunnin arkityöpäivän kustannukset pelkiltä työtunneilta ovat noin 10 % verrattuna taulukossa 3.1 tehtyihin taajuusmuuttajakäytön aloitus- ja hankintakustannusten hintoihin.

### 7.4.1. Huollettavuus

Tehtaiden automaatioasentajia haastatteleamalla selvisi, että eri sukupolvien ja laitevalmistajien taajuusmuuttajien huollettavuudessa on jonkin verran eroja: toisiin on esimer-

kiksi helpompi vaihtaa jäähdytyspuhaltimet kuin toisiin. Osassa taajuusmuuttajista täytyy esimerkiksi syöttö- ja moottorikaapelit irrottaa paikoiltaan, jotta jäähdytyspuhaltimeen pääsee käsiksi.

Haastatteluista kävi myös ilmi, että kohdeyrityksen tehtaille saadaan tarvittavat varaosat yleensä nopeammin Valmistaja B:n taajuusmuuttajiin kuin Valmistaja A:n taajuusmuuttajiin. Yleisesti ottaen varaosia on varsin hyvin saatavilla tehtailla oleviin taajuusmuuttajiin, mutta tehtaalta löytyi myös jokunen vanha taajuusmuuttaja, joiden varaosatuotannon laitevalmistaja on lopettanut. Varsinaisen taajuusmuuttajan laitevalmistaja tarjoaa näihin taajuusmuuttajiin päivityspaketteja, joissa vanhat, ei-tuotannossa olevat osat korvataan uusilla, tuotannossa olevilla osilla.

## 8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutkittiin taajuusmuuttajien luotettavuutta, huollettavuutta ja kunnossapitoa teollisessa ympäristössä. Toteutettu tutkimus koski UPM Kaipolan ja Jämsänkosken tehtaiden taajuusmuuttajakannassa hajonneita taajuusmuuttajia. Vikaantuneiden yksilöiden jälkeensä etsiminen osoittautui ajankäytön kannalta mahdottomaksi tehtäväksi, joten vikoja määriteltäessä täytyi luottaa UPM:n SAP-järjestelmään kirjattuihin tietoihin sekä huoltoon päätyneiden taajuusmuuttajien tapauksessa huoltoraportteihin. Työn pääpaino oli kuitenkin vertailla eri taajuusmuuttajavalmistajien välisiä eroja luotettavuudessa eri teholuokissa ja selvittää taajuusmuuttajien yleisimmät vikatyypit. Lisäksi pohdittiin vikoihin johtaneita syitä sekä keinoja vioilta välttymiseen.

Yleisimmiksi vikatyypeiksi paljastuivat taajuusmuuttajan jäähdytyspuhaltimiin liittyvät viat. Jäähdytyspuhaltimet ovat taajuusmuuttajan ainoa mekaanisesti kuluva osa, joten ne vaativat säännöllistä huoltoa. Tehtaiden taajuusmuuttajakanta on kuitenkin niin suuri, etteivät tehtaiden resurssit riitä huoltojen ajallaan tekemiseen sekä huoltotarpeiden riittävän tarkkaan seurantaan. Jäähdytyspuhaltimien mekaaninen kestävyys vaikuttaisi myös laskeneen viime vuosina, mikä käy ilmi jäähdytyspuhaltimien lyhyempinä suositusvaihtoväleinä sekä vikaantumistiheyden nousuna. Jäähdytyksen puutteesta sekä tehtaiden yleisestä ilmanlaadusta johtuvat myös useat muut taajuusmuuttajien vikatyypit: piirikorttiongelmien, liitinviat sekä kytkinkomponentteihin liittyvät viat. Taajuusmuuttajan piirikortit ikääntyvät sekä kärsivät korroosiosta, joka aiheutuu muun muassa tehtaiden huonosta ilmanlaadusta. Korrosio aiheuttaa ongelmia myös taajuusmuuttajien sisällä olevissa muovisissa liittimissä, joita joudutaan usein huoltojen yhteydessä irrottamaan ja uudelleen kiinnittämään. Puutteellisesta jäähdytyksestä kärsivät myös taajuusmuuttajan välipiirin elektrolyyttikondensaattorit, joiden elinikä lyhenee lämpötilan kasvaessa. Päävirtapiirin kytkinkomponenttien hajoamiseen voi olla useita syitä, kuten virtojen epäsymmetria tai lämpötilan vaihteluiden vaikutukset kytkinkomponenttiin.

Tutkimuksessa paljastui useita erilaisia vikatapauksia. Paljon vikojen syistä jäi epäselväksi, sillä vain harva taajuusmuuttaja oli lähetetty huoltoon ja vielä harvemmassa tapauksessa oli saatavilla huoltoraportti. Paperiteollisuudessa tärkeintä on usein saada mahdollisimman nopeasti toimiva taajuusmuuttaja hajonneen tilalle, jotta paperintuotanto saataisiin nopeasti jatkumaan. Usein ei ole resursseja tutkia vian aiheuttajaa. Halvimmat taajuusmuuttajat päätyvätkin vikaantuessaan usein suoraan elektroniikkajätelävalle. Tutkimuksessa kävi kuitenkin ilmi joitakin tapauksia, joissa samalta toimintopaikalta oli vaihdettu taajuusmuuttaja useaan kertaan. Tällöin tapaus pitäisi tutkia tarkemmin ja selvittää vian aiheuttaja, vaikka hetkellisestikin olisikin kannattavampaa vain vaih-

taa uusi taajuusmuuttaja hajonneen tilalle. Tehtailla on paljon taajuusmuuttajia erilaisissa sovelluksissa. Siksi samassa paikassa useasti vikaantuneen taajuusmuuttajan havaitseminen ei ole luotettavaa ilman toimivaa laitepaikkahistoriaa. Jos automaation laitepaikoilla olisi kattavat historiatiedot laitepaikalle tehdyistä huolloista, muutoksista ja vaihdoista päivämäärätietoineen, olisi helpompaa seurata automaatiolaitteisiin tehtyjen huoltojen vaikutusta käyttövarmuuteen ja luotettavuuteen. Myös taajuusmuuttajien varaosien saatavuuteen ja toiminnallisuuteen kannattaisi kiinnittää erityisesti piirikorttien osalta huomiota. Piirikorttien elektrolyyttikondensaattorit vanhenevat, jos kortit ovat jännitteettömänä pitkiä aikoja varastoituna.

Taajuusmuuttajan sarjanumerosta voidaan päätellä taajuusmuuttajan valmistuspäivämäärä. Kun tiedetään valmistuspäivämäärä sekä taajuusmuuttajan hajoamispäivämäärä, voidaan laskea taajuusmuuttajan elinikä. Tässä tutkimuksessa kävi ilmi, että taajuusmuuttajien eliniän laskeminen on mahdotonta, jos taajuusmuuttajan sarjanumeroa ei ole tallennettu järjestelmään taajuusmuuttajan laitepaikalle, vaikka hajoamispäivämäärä saataisiinkin selville. Hajonneen taajuusmuuttajan sarjanumeroa on lähes mahdotonta jäljittää jälkikäteen. Tämän vuoksi laitevalmistajien olisikin erittäin tärkeää luotettavuuden tutkimisen ja parantamisen kannalta kehittää sähköinen taajuusmuuttajakanta, josta kävisi ilmi taajuusmuuttajan sarjanumero sekä kohde, johon se on käyttöön otettu. Näin laitevalmistaja pystyisi itse tarkkailemaan kokonaisvaltaisesti tuotteidensa luotettavuutta sekä tarjoaisi mahdollisuuden ilmoittaa asiakkailleen mahdollisista ikääntymisestä johtuvista huoltotarpeista.

Tutkimukseen osallistuneilla paperitehtailla oli kriittisiä taajuusmuuttajavikoja viimeisen noin viiden vuoden aikana keskimäärin joka 26. päivä. Taajuusmuuttajat eivät ole nauttineet tehtailla suurta luotettavuutta, mikä johtuu paljolti erittäin suuresta taajuusmuuttajakannasta sekä sen sisältämistä usean eri sukupolven taajuusmuuttajista. Vikatilanteita tulee todennäköisyyksienkin valossa varsin usein. Lisäksi kaikkia suositeltuja taajuusmuuttajahuoltoja ei tehdä resurssien puutteesta johtuen, mikä nostaa vikaantumisien todennäköisyyttä. Suhteellisesti eniten vikoja oli isoimmissa, yli 250 kW taajuusmuuttajissa, ja suhteellisesti vähiten vikoja oli pienimmissä, alle 7,5 kW taajuusmuuttajissa. Valmistaja A:n taajuusmuuttajat olivat kokonaisuutena selvästi luotettavampia kuin Valmistaja B:n taajuusmuuttajat, mutta joissain teholuokissa tilanne oli myös toisin päin. Yli 250 kW teholuokassa Valmistaja B:t olivat hieman luotettavampia kuin Valmistaja A:t, mutta toisaalta Valmistaja A:n taajuusmuuttajia oli noin neljä kertaa enemmän kyseisessä teholuokassa, ja suuri osa niistä oli varsin vanhaa taajuusmuuttajasukupolvea. Valmistaja B:t olivat erityisen epäluotettavia teholuokassa 37 - 250 kW: noin 15 % niistä hajosi tarkasteluajanjakson aikana.

Luvussa 6 esiteltiin menetelmä taajuusmuuttajien IGBT-komponenttien elinikäennusteen tekemiseen. Paperitehtaalla on jonkin verran syklisiä käyttöjä, jotka aiheuttavat suuria lämpötilan muutoksia IGBT-komponenteille, mikä laskee komponenttien elinikäennustetta. Tulevaisuudessa tällaiset sykliset käytöt tulisi pystyä tunnistamaan etukäteen, ja mitoittaa taajuusmuuttaja sekä huoltovälit niiden vaatimalla tavalla.

Yleisesti ottaen työ oli mielenkiintoinen ja haastava. Tutkimuksessa on ehkä jonkin verran epäluotettavuutta vikahistoriatietojen puutteista johtuen. Taajuusmuuttajien luotettavuuden parantaminen vaatisi tulevaisuudessa tiiviimpää yhteistyötä laitevalmistajien ja taajuusmuuttajien loppukäyttäjien välillä. Laitevalmistajan olisi hyvä tietää tarkemmin millaiseen sovellukseen ja ympäristöolosuhteisiin tilattu taajuusmuuttaja aiotaan sijoittaa. Aiheeseen liittyy edelleen paljon kehitystarpeita ja -mahdollisuuksia taajuusmuuttajien luotettavampaa tulevaisuutta ajatellen.

## LÄHTEET

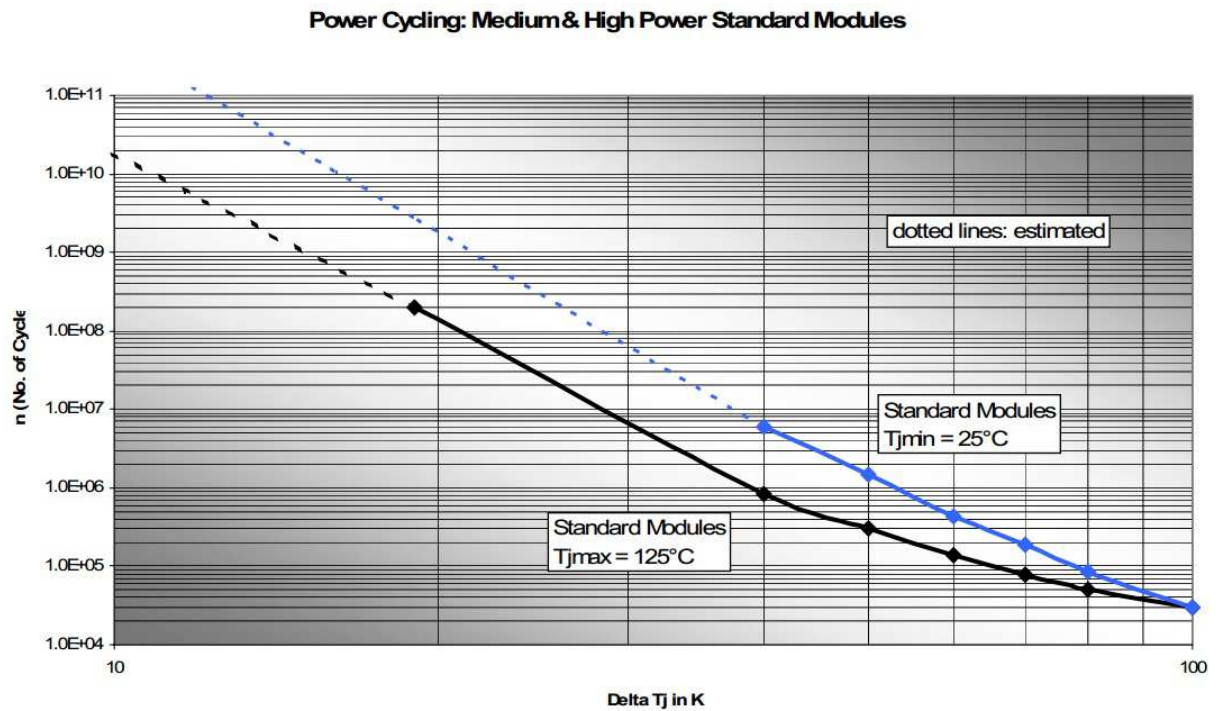
- [1] Turunen, A. Suomen taajuusmuuttajamarkkinat, Diplomityö. 1997. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 88 s.
- [2] Mäkinen, M. J.J., Kallio, R., 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Helsinki, Otava. 239 s.
- [3] Mäkinen, M. J.J., Kallio, R., Tantarimäki, R., 2009. Prosessiteollisuuden sähkö- ja automaatioasennukset. Helsinki, Otava. 261 s.
- [4] Hietalahti, L. Tehoelektroniikan perusteet. 2011. Amk-kustannus Oy, Tammer tekniikka. 124 s.
- [5] TEL-1120 Vaihtosuuntaajat. Luentomateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto. 2009.
- [6] Haapala, M. 2001. Taajuusmuuttajien testauksen tehostaminen. Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu. 61 s.
- [7] Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P., 1995. Power Electronics, Second Edition. USA, John Wiley & Sons, inc. 802 s.
- [8] Mattila, M. 2008. Lämpötilan vaihteluiden vaikutukset vaihtosuuntaajan IGBT-moduuliin (Insulated Gate Bipolar Transistor). Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 81 s.
- [9] Niiranen, J., 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki, Otatieto. 379 s.
- [10] Niiranen, J., 2007. Tehoelektroniikan komponentit. Helsinki. Otatieto Oy. ISBN-978-951-672317-7. 234 s.
- [11] Nichicon corporation. General Description of Aluminum Electrolytic Capacitors.[WWW]. <http://www.nmr.mgh.harvard.edu/~reese/electrolytics/tec1.pdf> Viitattu 24.08.2012
- [12] Nichicon corporation. General Description of Aluminum Electrolytic Capacitors.[WWW] <http://www.nmr.mgh.harvard.edu/~reese/electrolytics/tec2.pdf> Viitattu 24.08.2012.

- [13] Karjalainen, Veikko. Huoltokoulu osa 6, Kuivat ja märät elektrolyytit. [WWW].[http://physics.uku.fi/studies/kurssit/ELE1/luennot/hk\\_elkot.pdf](http://physics.uku.fi/studies/kurssit/ELE1/luennot/hk_elkot.pdf). Viitattu 24.08.2012.
- [14] IEC Standard 60529. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code).2001. International Standard.
- [15] Vacon NSX, Monipuolinen ratkaisu luotettavaan prosessin säätöön. Tuote-esite. Vacon Oyj. 11 s.
- [16] Taajuusmuuttajat, Vacon CX/CXL/CXS käyttöohje, "Five in One+" -sovellusopas. Vacon Oyj. 319 s.
- [17] ACS800 Hardware Manual. Käyttöohje. ABB Oy.150 s.
- [18] Heinonen, R., Lahtinen, R., VTT 2000. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa, Espoo. ISBN 951-38-5019-6. 221 s
- [19] Suomen Korroosioyhdistys, Korroosiokäsikirja, 1988. ISBN 951-99916-7-0, 966 s.
- [20] Pernu, H., P. 2010. Käyttövarmuuden ja kunnossapidon perusteet KSU-4310. Helsinki, Tammi. 436 s.
- [21] Standardi SFS-ISO 9000-4 EN 60300-1. Luotettavuuden hallinta. Osa 1: Luotettavuusjohtaminen. 2004. 25 s.
- [22] Cluley, J. C., 1981. Electronic Equipment Reliability. Second Edition. The MacMillan Press ltd, London. 177 s.
- [23] Laitinen, J., 2010. RCM Luotettavuuskeskeinen kunnossapito. Käyttövarmuuden ja kunnossapidon perusteet KSU-4310. Kurssimateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto. 22 s.
- [24] Haastattelu, Timo Happonen, Gardner Denver Oy. 24.2.2012.
- [25] High-power IGBT-module MBN500H65E2. Datasheet. Hitachi. [WWW].<http://www.hitachi.co.jp/products/power/pse/products/igbt/high/index.html> Viitattu 19.09.2012



## LIITE 1: IGBT-MODUULIN PUOLIJOHTEEN SYK- LIKESTOISUUS

Tässä liitteessä on esitelty IGBT-moduulin liitoslangan ja substraatin välisen liitoksen sekä puolijohteen ja substraatin välisen juotteen periaatteellinen syklikestoituskäyrä.



## LIITE 2: IGBT-MODUULIN POHJALEVYN JA SUB- STRAATIN VÄLINEN SYKLIKESTOISUUS

Tässä liitteessä on esitelty IGBT-moduulin pohjalevyn ja substraatin välinen periaatteellinen sykliskestoisuuskäyrä.

